المنظمة العربية للترجمة
المعهد العالي العربي للترجمة

برايان غرين

الكون الأنيق

الأوتار الفائقة، والأبعاد الدفينة، والبحث عن النظريّة النهائيّة

ترجمة:
د. فتح اللّه الشيخ

توزيع: مركز دراسات الوحدة العربية

الكون الأنيق

الأوتار الفائقة، والأبعاد الدفينة،
والبحث عن النظرية النهائية

المنظمة العربية للترجمة
المعهد العالي العربي للترجمة ـ الجزائر

برايان غرين

الكون الأنيق

الأوتار الفائقة، والأبعاد الدفينة، والبحث عن النظرية النهائية

ترجمة:
د. فتح الله الشيخ

مراجعة:
د. أحمد عبد الله السماحي

الفهرسة أثناء النشر - إعداد المنظمة العربية للترجمة
غرين، برايان
الكون الأنيق: الأوتار الفائقة، والأبعاد الدفينة، والبحث عن النظرية النهائية/ برايان غرين؛ ترجمة فتح الله الشيخ؛ مراجعة أحمد عبد الله السماحي.
467 ص.ـ (ثقافة علمية معاصرة)
ببليوغرافية: ص 451-455.
يشتمل على فهرس.
ISBN 9953-0-0431-5
1. علم الكونيات. 2. نظريات الأوتار الفائقة. أ. العنوان. ب. الشيخ، فتح الله (مترجم). ج. السماحي، أحمد عبد الله (مراجع). د. السلسلة.
539.7

المنظمة العربية للترجمة

بناية شاتيلا، شارع ليون، ص. ب: 5996-113
الحمراء - بيروت 2090 1103 - لبنان
هاتف: 753031 (9611) / فاكس: 753032 (9611)
e-mail: info@aot. org. lb - http://www. aot. org. lb

توزيع: مركز دراسات الوحدة العربية

بناية «سادات تاور» شارع ليون ص.ب: 6001 ـ 113
الحمراء ـ بيروت 2090 1103 ـ لبنان
تلفون: 869164 ـ 801582 ـ 801587
برقياً: «مرعربي» ـ بيروت / فاكس: 865548 (9611)
e-mail: info@caus.org.lb - http://www.caus.org.lb

الطبعة الأولى: بيروت، أيار (مايو) 2005

إلى أمي وذكرى والدي
مع حبي وامتناني

المحتويات

تصدير

كتاب "الكون الأنيق" ليس كتاباً علمياً عادياً باللغة الإنكليزية فقط ولكنه كتاب يعرض أحدث النظريات في الفيزياء وعلم الكون (الكوسمولوجيا) في لغة أدبية رفيعة وأسلوب مشوق مثل الروايات أو الأحداث الدرامية. ومؤلف الكتاب عالم من الذين شاركوا في إبداع هذه النظريات، وهو أديب يستخدم كل أدوات البلاغة في اللغة الإنكليزية، الأمر الذي يرهق أي مترجم علمي. وإنني أقر هنا أنه لولا الدراية الواسعة للصديق العزيز الدكتور أحمد عبد الله السماحى - مراجع الترجمة - باللغة الإنكليزية وبنواحي الحياة الأمريكية التي استقى منها المؤلف رواياته وأمثلته وتشبيهاته، ولولا سعة صدره وتحمله لمجادلاتنا الطويلة والعديدة، لما أمكن إنجاز هذه الترجمة.

وإنني لأتقدم بالشكر لكل من ساهم في تفسير أو شرح وتبيان كلمة أو جملة أو فقرة في هذا الكتاب، وأخص بالشكر السيدة كاترين-ماري السماحي المتخصصة في اللغة الإنجليزية والترجمة، والسيدة سحر توفيق على تصويباتها لنص الترجمة. وأدين بالشكر لأستاذنا الدكتور أحمد مستجير لتحمسه وتشجيعه.

وإذا كان "غرين" - مؤلف الكتاب - قد كتب "الكون الأنيق" إيماناً منه بضرورة وجوده لفئات عريضة من الناس - كما ذكر في مقدمته - فإنني أرجو أن ينتفع بترجمته إلى العربية جمهور كبير من القراء، متخصصين وغير متخصصين.

د. فتح الله الشيخ

*

الكتاب الذي بين يدينا فريد في عدة أمور، الأمر الأول أنه يعرض آخر ما توصلت إليه علوم الفيزياء والكون وأحدث أخبار علمائها، والأمر الثانى أنه مكتوب بلغة رصينة وأدبية رفيعة وبأسلوب رائع، أما الأمر الثالث فهو أن المؤلف يخاطب في الكتاب كل الناس (طلاباً وعلماء ومثقفين وعاديين)، والكتاب بذلك نادر وثمين.

وقد جاءت مراجعتي للترجمة متزامنة مع الترجمة نفسها، وهو ما جعل من عملية المراجعة وكأنها مشاركة في الترجمة، وأدخلَنا ذلك، مع المترجم -

الصديق العزيز الدكتور فتح الله الشيخ، في جدال بلغ الذروة أحياناً، التزاماً منا بالأمانة العلمية، وتدقيقاً للمعانى والمدلولات، وانحيازاً للغة العربية التي تشق طريقها في ساحة العلوم والمعارف البشرية الحديثة بصعوبة بالغة، بعد أن كانت هي لغة العلوم والمعارف البشرية لقرون عديدة.

وعندما انتهت الترجمة والمراجعة شعرت بسعادة غامرة لأن عملاً مثل هذا سيصبح قريباً في متناول القارئ العربي، وسيزيّن المكتبة العربية بآخر إنجازات العلم الحديث.

د. أحمد عبد الله السماحي

مقدمة المؤلف

ظل آينشتاين خلال الثلاثين سنة الأخيرة من حياته يحث من دون كلل على ما يطلق عليه نظرية المجال الموحد - نظرية قادرة على وصف قوى الطبيعة في إطار شامل مترابط. لم يكن آينشتاين مدفوعاً بأشياء ترتبط غالباً بالمسلك العلمي مثل محاولة تفسير هذه أو تلك من البيانات التجريبية، لكنه كان مدفوعاً باعتقاد حماسي في أن الفهم العميق للكون قد يكشف عن أكثر عجائبه مصداقية: بساطة ومقدرة المبادئ التي تأسس عليها. أراد آينشتاين أن يلقي الضوء على أحداث الكون بوضوح لم يصل إليه أحد من قبل، ما يجعلنا نقف خاشعين أمام أناقة وروعة الكون.

لم يتوصل آينشتاين أبداً لتحقيق هذا الحلم، لأن في أيامه كان كثير من الأمور يقف حجر عثرة في سبيل ذلك. كان هناك عدد من السمات الأساسية للمادة، وقوى الطبيعة إما غير معروفة، أو في أحسن الظروف مفهومة بقدر ضئيل. لكن الفيزيائيين خلال نصف القرن الأخير مروا بعثرات ونجاحات ودخلوا طرقاً معتمة في بعض الأحيان، وظلوا يشيدون بثبات، بناءً على اكتشافات من سبقوهم، ليجمعوا معاً فهماً أكثر عمقاً عن كيفية عمل الكون. والآن، وبعد فترة طويلة منذ أن تساءل آينشتاين عن نظرية موحدة وخرج من ذلك خاوي الوفاض، فإن الفيزيائيين يعتقدون أنهم توصلوا أخيراً إلى إطار ينسج كل هذه الأفكار مع بعضها في ثوب متناغم لنظرية متفردة. هي في الأصل قادرة على وصف كل الظواهر الفيزيائية. تلك هي "نظرية الأوتار الفائقة"، موضوع هذا الكتاب.

وقد قمت بكتابة "الكون الأنيق" في محاولة لجعل الأفكار الثاقبة التي انبثقت من طليعة بحوث الفيزياء متاحة لقطاع عريض من القراء، وخاصة أولئك غير المتعمقين في الرياضيات أو الفيزياء. ومن خلال المحاضرات العامة التي ألقيتها عن الأوتار الفائقة لاحظت تشوقاً واسع الانتشار لفهم ما الذي تتناوله الأبحاث المعاصرة حول القوانين الحالية للكون، وكيف أن هذه القوانين تتطلب إعادة صياغة شاملة لمفهومنا عن الكون والتحديات التي تعترض التوصل إلى النظرية الحتمية. وإنني لآمل أن يثري هذا الكتاب ويشفي الفضول بما سنشرحه من الإنجازات العظمى التي حدثت في الفيزياء بدءاً من آينشتاين وهيزنبرغ، وكيف أن اكتشافاتهما قد أزهرت في التقدم الهائل الذي وصلنا إليه هذه الأيام.

وإنني لآمل أن يجد كتاب "الكون الأنيق" اهتماماً لدى القراء الذين يحظون بقدر من الخلفية العلمية. كما آمل أن يبلور هذا الكتاب بعض الموضوعات الأساسية من الفيزياء الحديثة لطلاب العلوم ومعلميهم، مثل النسبية الخاصة والنسبية العامة وميكانيكا الكم، وكذلك آمل أن أنقل عدوى الحماس للباحثين ليسدوا كل الثغرات على طريق التوصل إلى النظرية الموحدة التي نفكر في اكتشافها منذ أمد طويل. وقد حاولت أيضاً، بالنسبة للقارئ الشره للعلوم الميسرة، أن أفسر الكثير من التقدم المبهج في فهمنا للكون والذي تم التوصل إليه في العقد الأخير. أما بالنسبة لزملائي في فروع العلوم الأخرى، فإنني آمل أن يقدم هذا الكتاب إحساساً مخلصاً ومتوازناً لما يشعر به منظرو نظرية الأوتار من حماس حول التقدم الذي يجري للتوصل إلى النظرية الحتمية للطبيعة.

تبعث نظرية الأوتار الفائقة مجالاً عريضاً متشابكاً. فهي موضوع عميق ومتسع يتعرض لكثير من الاكتشافات المحورية في الفيزياء. وحيث أن هذه النظرية توحد القوانين المتعلقة بالأمور الكبرى والأمور الصغرى، القوانين التي تتحكم في فيزياء أبعد مناطق الكون وفي فيزياء أدق أجزاء المادة، فإن هناك طرقاً كثيرة يمكن أن نطرق بها هذا الموضوع. وقد اخترت أن أركز فهمنا المتطور للفضاء والزمان. وقد وجدت أن ذلك مسلك متنام محكم بصفة خاصة، وهو المسلك الذي يشق طريقه بضربة منجل خلال الأفكارَ الأساسية الجديدة. بيّن آينشتاين للعالم أن الفضاء والزمان يسلكان بطريقة غير مألوفة، بل مذهلة. وقد ربطت أحدث الأبحاث اكتشافات آينشتاين بعالم الكم عن طريق العديد من الأبعاد الدفينة الملفوفة في نسج الكون - الأبعاد التي تلتف بإحكام هندسي يمكن أن تكون مفتاح حل أعقد الأسئلة التي واجهناها. ومع أن بعض هذه المفاهيم غير واضح، إلا أننا سنرى أنه من الممكن فهمها باستخدام تشبيهات في غاية البساطة. وعندما تصبح هذه الأفكار مفهومة فإنها تقدم منظوراً مدهشاً وثورياً عن الكون.

وخلال كل الكتاب، حاولت أن ألتزم ما أمكن بالجانب العلمي وفي نفس الوقت أن أقدم للقارئ فهماً حدسياً - غالباً من خلال التشبيه والاستعارة - عن الكيفية التي توصل بها العلماء إلى المفاهيم المعاصرة عن الكون. وبالرغم من تجنبي استخدام اللغة التقنية والمعادلات، وبسبب تضمن الموضوع لمفاهيم راديكالية جديدة، فإن القارئ يحتاج للتوقف بين حين وآخر ليتأمل مقطعاً هنا أو للتفكير في تفسير ما هناك، ليتمكن من متابعة تقدم الأفكار تماماً. ومقاطع قليلة في الجزء الرابع من الكتاب (التي تركز على أحدث التطورات) هي الأكثر تجريداً من بقية الأجزاء، وقد حرصت على أن أحذر القارئ مسبقاً من هذه المقاطع،

وأن أقَسِّمَ المتن بحيث يتمكن القراء من المرور عليها في عجالة أو حتى تخطيها من دون أن يؤثر ذلك إلاّ في أضيق الحدود في الانسيابية المنطقية للكتاب. وقد ضمنت الكتاب مسرداً بالمصطلحات العلمية لنذكر القارئ بطريقة سهلة ومتاحة بالأفكار الواردة في متن الكتاب. ومع أن القارئ العادي قد يرغب في التغاضي عن الملحوظات تماماً، إلا أن القارئ الأكثر اهتماماً سيجد في هذه الملحوظات شرحاً أطول لبعض النقاط التى جاءت في متن الكتاب، وتوضيحاً لأفكار تم تبسيطها، وكذلك بضع جولات تقنية لهؤلاء المهتمين بالرياضيات.

إنني أدين بالشكر لكثير من الناس لمساعداتهم لي أثناء إنجاز هذا الكتاب. فقد قرأ دافيد شتاينهاردت المخطوطة بعناية عظيمة، وأمدني بكرم بأفكار ثاقبة وبحماس لا يقدر بثمن فيما يتعلق بالتحرير. كذلك قرأ المخطوطة بعناية كل من دافيد موريسون، وكين فاينبرغ، ورفائيل كاسبر، ونيكولاس بولس، وستيفن كارليب، وآرثر غرينسبون، ودافيد ميرمين، ومايكل بوبويتس، وشاني أوفين، وقدموا اقتراحاتهم وانطباعاتهم ما ساعد كثيراً في عرض الكتاب. أما الآخرون الذين قرأوا كل المخطوطة أو جزءاً منها وقدموا نصائحهم وتشجيعهم فهم بول آسبينول، وبيرسيس دريل، ومايكل داف، وكورت وتفرايد، وجوشوا غرين، وتيدي جيفرسون، ومارك كاميونكوفسكي، وياكوف كانتر، وأندراس كوفاكس، ودافيد لي، وميغان ماك إيون، وناري ميستري، وهسان بادامين ورونين بليسير، وماسيمو بوراتي، وفريد شيري، ولارس سترايتر، وستيفن ستروغاتس، وأندرو سترومنغر، وهنري تاي، وكومرون فافا، وغابرييل فينزيانو. وإنني أدين بشكل خاص لرفائيل غانر لنقده الثاقب ولأمور أخرى كثيرة أثناء فترة إعداد الكتاب في مراحله المبكرة، الأمر الذي ساعد في صياغة الشكل العام للكتاب. وكذلك أدين بالشكر الخاص لروبرت مالي لتشجيعه الرقيق والدؤوب الذي تعدى مرحلة التفكير إلى "بدء الكتابة". وقد قدم ستيفن وينبرغ وسيدني كولمان نصائح قيمة ومعاونة، كما أنه من دواعي سروري الاعتراف بالمداخلات الجيدة لكارول آرشر، وفيكي كارستنس، ووينذي غرين، وإيريك جندرسون، وغاري كاسي، وشيفا كومر، وروبرت موهيني، وبام مورهاوس، وبيير راموند، وأماندا سالز، وبيرو سيمونسيلي. كما أنني ممتن لكوستاس يفثيميو على مساعدته في مراجعة الحقائق وإيجاد المراجع وعلى تحويله رسومي التخطيطية الأصيلة إلى رسوم واضحة تمكن بواسطتها توم روكويل من إبداع الأشكال التي جملت الكتاب. وذلك بصبر القديسين وعين الفنان المبدع. كما أنني أشكر أندرو هانسون وجيم سينثيا لمساعدتهما لي في إعداد بضعة أشكال متخصصة.

وإنني لأشكر كل من وافقوا على مقابلتي ومنحي وجهة نظرهم في الموضوعات المختلفة التي غطاها الكتاب، وهم هوارد جيورجي، وشيلدون غلاشو، ومايكل غرين، وجون شوارتز، وجون ويلر، وإدوارد ويتن، واندرو سترومنغر مرة ثانية هو وكومرون فافا، وغابرييل فينزيانو.

ومن دواعي سعادتي أن أُقر بأفكار واقتراحات أنجِيلا فون درليب التي لا تقدر قيمتها، وكذلك الحساسية الفائقة تجاه التفاصيل التي أبداها تراسي ناغل وناشريَّ في دار و. و. نورتون، وقد ساعدوا جميعاً في توضيح العرض. كما أنني أشكر وكيلَيَّ الأدبيين جون بروكمان، وكاتينكا ماتسون، لإرشاداتهما الخبيرة ورعايتهما للكتاب من بدايته وحتى نشره.

وإنني أقر بكل امتنان بالدعم الكريم لأبحاثي في الفيزياء النظرية على مدى أكثر من عقد ونصف من السنين بواسطة المؤسسة القومية للعلوم ومؤسسة ألفريد أ. سلون، وقسم الطاقة بالولايات المتحدة. وربما ليس غريباً أن تكون أبحاثي قد تركزت على تأثير نظرية الأوتار الفائقة على مفهومنا عن الزمان والمكان، وفي الفصلين الأخيرين قمت بشرح بعض الاكتشافات التي كان لي حظ المشاركة في إنجازها. ومع أنني آمل أن يستمتع القارئ بالأمور "الداخلية"، فإنني أدرك أن ذلك قد يترك انطباعاً مبالغاً فيه عن الدور الذي لعبته في تطوير نظرية الأوتار الفائقة. ولذلك أنتهز هذه الفرصة لأقر بفضل أكثر من ألف فيزيائي من جميع أنحاء العالم، ساهموا وكرسوا حياتهم لجهود تحديث النظرية النهائية للكون. وإنني أعتذر لكل الذين لم يتضمن الكتاب أبحاثهم، ولا يعكس ذلك إلا وجهة النظر التي اخترتها وتحديد حجم الكتاب.

وأخيراً، إنني أدين بالشكر من كل قلبي لآلين آرشر على الحب الأصيل والدعم اللذين بدونهما لم يكن لهذا الكتاب أن يرى النور.

القسم الأول

حدُّ المعرفة

الفصل الأول

التشابك مع الوتر

ظل علماء الفيزياء لأكثر من نصف قرن على دراية بأن هناك سحباً داكنة تلُوح في الأفق البعيد، حتى وهم في أوج الاكتشافات العلمية العظمى في التاريخ. ولو أطلقنا على ما حدث "محاولة الاختباء" لكان ذلك شيئاً درامياً جداً. كانت المشكلة تتمثل في أن الفيزياء الحديثة تقوم على ركيزتين أساسيتين. الأولى هي النظرية النسبية العامة لألبرت آينشتاين، وهي تمنحنا الإطار النظري لفهم العالم في أبعاده الكبرى: النجوم والمجرات وتجمعات المجرات، وحتى ما وراء المدى البعيد للكون نفسه. أما الركيزة الثانية فهي ميكانيكاً الكم، وهي التي تزودنا بالإطار النظري لفهم العالم في أصغر أبعاده: الجزيئات والذرات وحتى الدقائق تحت الذرية مثل الإلكترونات والكواركات. وفي نهاية المطاف، أيقن علماء الفيزياء تجريبياً، وعلى مدى سنوات عديدة من البحث، صحة كل التنبؤات التي بشرت بها كل من هاتين النظريتين. غير أن نفس هذه الوسائل النظرية أدت وبشكل لا يقبل الجدل إلى نتيجة غير مريحة: تبعاً للصياغة الحالية لنظرية النسبية العامة ونظرية ميكانيكا الكم، فإن إحداهما تنفي الأخرى بحيث لا بد من أن تكون واحدة منهما فقط على صواب. وهكذا فإن النظريتين اللتين تشكلان أساس التقدم الهائل في الفيزياء خلال المائة عام الماضية - التقدم الذي فسَّر تمدد السماوات من جهة، وفسَّر البنية الأساسية للمادة من جهة أخرى - غير متوافقتين.

وإذا لم تكن قد سمعت مسبقاً بهذا التناقض الحاد فربما ستعجب لماذا. وليست الإجابة صعبة المنال. ففي معظم الحالات يقوم الفيزيائيون إمّا بدراسة الأشياء الصغيرة الخفيفة (مثل الذرات ومكوناتها)، أو بدراسة الأشياء الكبيرة الثقيلة (مثل النجوم والمجرات)، وليس الأمرين معاً.

ومعنى ذلك أنهم يحتاجون لاستخدام نظرية ميكانيكا الكم فقط أو النظرية النسبية فقط. وهم في ذلك يتجاهلون عن عمد التحذيرات التي تطلقها النظرية الأخرى. وعلى مدى خمسين سنة، لم يكن هذا الاتجاه مصدر اطمئنان من

ناحية، ولا محل إهمال من ناحية أخرى، لكنه ظل ماثلاً أمام علماء الفيزياء طول الوقت.

من المحتمل أن يكون للكون نهاية. ففي أعماق الثقوب السوداء تنسحق أية كتلة هائلة لتتحول إلى حجم متناهي الصغر. كان الكون لحظة الانفجار الهائل "Big Bang" قد تفجَّرَ عن كتلة ميكروسكوبية إذا ما قورنت بحبة رمل لبدت حبة الرمل عظيمة الحجم. وهذه العوالم دقيقة لكنها فائقة الكتلة، الأمر الذي يتطلب تطبيق كل من نظريتي ميكانيكا الكم والنسبية العامة في آن واحد. ولأسباب ستزداد وضوحاً كلما تقدمنا في هذا الكتاب، فإن الأمور تبدأ في الاضطراب والجيشان والاندفاع مثل البخار عندما يندفع من سيارة تخطت درجة حرارتها علامة الخطر. ويحدث كل ذلك لو حاولنا استخدام معادلات نظرية النسبية العامة ومعادلات ميكانيكا الكم معاً. فإذا أخذنا أسئلة الفيزياء ذات الصياغة الجيدة والتي لا تتضمن بلاغة معينة وعالجناها بمزج هاتين النظريتين، فإننا سنحصل على إجابات غير منطقية. وحتى إذا أردنا أن نستبقي أعماق الثقوب السوداء وبدايات الكون على التناقض والتنافر القائم بين ميكانيكا الكم والنسبية العامة، فإنهما يلحان في طلب مزيد من الفهم. تُرى هل من الممكن أن يكون العالم منقسماً في عمق مستوياته الأساسية بحيث يتطلب مجموعة من القوانين عند التعامل مع الأشياء الكبرى ومجموعة أخرى مختلفة وغير متوافقة مع الأولى عند التعامل مع الأشياء الصغرى؟

تتصدى نظرية الأوتار الفائقة (Superstring Theory) للإجابة عن ذلك، وهي النظرية التي ظهرت حديثاً - مقارنة بالصرحين العظيمين لميكانيكا الكم والنسبية العامة - وتأتي إجابتها مدوية: لا. وقد بينت الأبحاث المكثفة لعلماء الفيزياء والرياضيات من جميع أنحاء العالم خلال العقد الأخير أن الاتجاه الجديد في وصف المادة في أقصى مستوياتها الأساسية سيزيل التوتر بين النسبية العامة وميكانيكا الكم. وفى الواقع فإن نظرية الأوتار الفائقة تعني المزيد: يتطلب الإطار الجديد احتياج كل من النسبية العامة وميكانيكا الكم إحداهما للأخرى لتصبح هذه النظرية (الأوتار الفائقة) مقبولة. وتبعاً لنظرية الأوتار الفائقة فإن التزاوج بين قوانين الأشياء الكبرى والصغرى لم يعد مُرْضياً فقط، بل بات حتمياً.

وهذه بعض الأخبار الطيبة. فنظرية الأوتار الفائقة - وتسمى اختصاراً نظرية الأوتار - تذهب بهذا الاتحاد أبعد من ذلك في خطوة عملاقة. ظل آينشتاين على مدى ثلاثة عقود يبحث عن نظرية موحدة في الفيزياء، وهي النظرية التي تتشابك

فيها كل قوى الطبيعة والمكونات المادية في نسيج نظري واحد. لكنه فشل في ذلك. واليوم ومع مطلع الألفية الجديدة يدعي مؤيدو نظرية الأوتار أن خيوط هذا النسيج الواحد المراوغ قد اتضحت أخيراً. وتملك نظرية الأوتار المقدرة على إظهار أن كل الأحداث العجيبة التي تجري في الكون بداية من الرقص العشوائي للكواركات (الجسيمات تحت الذرية) إلى الفالس التقليدي لمنظومة مكونة من نجمين يدوران أحدهما حول الآخر، وبداية من كرات اللهب البدائية في الانفجار الهائل (Big Bang) إلى الدوران المهول للمجرات في السماء. كل هذا مجرد انعكاسات لمبدأ فيزيائي عظيم، وسيادة لمعادلة واحدة.

وحيث إن ملامح نظرية الأوتار تتطلب أن نغير مفاهيمنا عن المكان والزمان والمادة تغييراً جذرياً، فإن الأمر سيستغرق بعض الوقت للتعود عليه ولنتمكن من سبر أغواره عند مستوى معقول. وكما سيتضح بجلاء عندما ننظر إلى نظرية الأوتار في الإطار الصحيح، فإنها ستنبثق بشكل درامي لكن طبيعي كنتيجة للاكتشافات الثورية في الفيزياء خلال المائة عام الماضية. وسنرى في الحقيقة أن التناقض بين النسبية العامة وميكانيكا الكم ليس هو الأول، بل الثالث في سلسلة متتابعة من التناقضات المحورية التي أمكن حصرها خلال القرن الماضي. وقد أدى حل كل تناقض منها إلى مراجعة شاملة لمفهومنا عن الكون.

أولاً: التناقضات الثلاثة

تم التعرف على أول هذه التناقضات في أواخر القرن التاسع عشر، وهو يتعلق بالخواص المحيِّرة لحركة الضوء. وباختصار، وطبقاً لقانون الحركة لنيوتن فإنك إذا ركضت بسرعة كافية يمكنك أن تلحق بشعاع الضوء. لكن، وتبعاً لقوانين جيمس كلارك ماكسويل عن الكهرومغناطيسية، فإنك لن تستطيع. وكما سنرى في الفصل الثاني من هذا الكتاب حل آينشتاين هذا التناقض بواسطة النظرية النسبية الخاصة، وهو بذلك قد غير مفهومنا عن المكان والزمان كليةً. وطبقاً للنسبية الخاصة لا يمكن أن نفكر في المكان والزمان كمفهوم عالمي جامد ثابت يشعر به كل إنسان بنفس الشكل، لكنهما يبدوان - المكان والزمان - في أبحاث آينشتاين كبنى طيعة يعتمد شكلها ومظهرها على حالة الحركة التي عليها المشاهد.

وعلى الفور قام تطور النسبية الخاصة بإعداد المسرح لظهور التناقض الثاني. تنص إحدى نتائج أبحاث آينشتاين أنه لا يمكن لأي جسم - وفي الحقيقة ولا لأي تأثير أو اختلال من أي نوع - أن ينتقل بسرعة أكبر من سرعة الضوء. وكما سنرى في الفصل الثالث، فإن نظرية نيوتن الكونية للجاذبية - وهي النظرية

الناجحة عند تجربتها والمقبولة حدسياً - تتضمن انتقال التأثيرات لمسافات شاسعة "لحظياً". كان آينشتاين مرة أخرى هو الذي قام بحل هذا التناقض الثاني. وقدم مفهوماً جديداً للجاذبية ضمن نظرية النسبية العامة عام 1915. وقد غيرت النسبية العامة المفاهيم السابقة عن المكان والزمان تماماً كما فعلت من قبلها النسبية الخاصة. فكل من المكان والزمان لا يتأثران فقط بحركة المشاهد بل إنهما قد ينحرفان ويلتويان تبعاً لوجود المادة أو الطاقة في طريقهما. وتؤدى مثل هذه التشوهات في نسيج المكان والزمان إلى انتقال قوى الجاذبية من مكان إلى آخر كما سنرى. وبذلك فإن المكان والزمان لا يمكن اعتبارهما بعد ذلك مجرد خلفية خاملة تجري عليها أحداث العالم، بل إنهما، ومن خلال نظريتي النسبية الخاصة والعامة، يؤديان أدواراً خاصة في نفس الأحداث.

وتتكرر الصورة مرة أخرى: فعندما حلَّ اكتشاف النسبية العامة أحد التناقضات أدى إلى ظهور تناقض آخر. وقد طور علماء الفيزياء ميكانيكا الكم على مدى ثلاثة عقود بدءًا من سنة 1900 (سنناقش ذلك في الفصل الرابع) وذلك كرد فعل لعدد من المشاكل القوية التي ظهرت عند تطبيق مفاهيم الفيزياء في القرن التاسع عشر على العالم الميكروسكوبي. وكما ذكرنا سابقاً، فإن التناقض الثالث والأكثر حدة قد ظهر من عدم التوافق بين ميكانيكا الكم والنسبية العامة. وكما سنرى في الفصل الخامس، فإن الانحناء الهندسي الرقيق لشكل الفراغ والناتج من النسبية العامة، يتناقض مع السلوك المتذبذب القلق على المستوى الميكروسكوبي للعالم تبعاً لميكانيكا الكم. ظل الأمر كذلك حتى منتصف الثمانينيات من القرن العشرين عندما قدمت نظرية الأوتار حلاً لهذا التناقض الذي هو المشكلة المحورية في الفيزياء الحديثة. وبجانب ذلك تتطلب نظرية الأوتار - القائمة على النسبية الخاصة والعامة - تجديد مفاهيمنا عن المكان والزمان بشكل جذري. فعلى سبيل المثال يتعامل معظمنا مع الكون على أنه ذو ثلاثة أبعاد فراغية. غير أن الأمر ليس كذلك وفقاً لنظرية الأوتار التي تنص على أن للعالم أبعاداً أكثر كثيراً مما تشاهده العين . وهي الأبعاد المضفرة بقوة في نسيج الكون المطوي. وتشغل هذه الأفكار المتميزة موقعاً مركزياً في طبيعة المكان والزمان، وهي التي سنستخدمها كعلامة استرشادية في كل ما يأتي لاحقاً. وبشكل واقعي، فإن نظرية الأوتار هي قصة المكان والزمان منذ عهد آينشتاين.

وحتى نقرّ لنظرية الأوتار بالفضل، فإننا نحتاج إلى الرجوع خطوة للوراء لنصف بإيجاز ما تعلمناه خلال القرن الماضي عن بنية الكون الميكروسكوبية.

ثانياً: الكون في أصغر أبعاده: ما الذي نعرفه عن المادة؟

كان الإغريق القدماء يعتقدون أن الكون مصنوع من دقائق "غير قابلة للانقسام" أطلقوا عليها ذرات (Atoms). وكما في اللغات ذات الأبجدية حيث يتكون العدد الهائل من الكلمات من تجمع عدد محدود من الحروف، فإن الإغريق كانوا يظنون أن الكم الهائل من المواد يتكون هو الآخر من اتحاد عدد صغير من وحدات بناء أولية معينة. كان ذلك مجرد تخمين غيبي. وبعد مرور أكثر من ألفي عام ما زلنا نعتقد في صحة ذلك بالرغم من أن خواص وحدات البناء الأساسية قد خضعت لتعديلات عديدة. وقد بين علماء القرن التاسع عشر أن الكثير من المواد المألوفة مثل الأكسجين والكربون تتكون من مكونات دقيقة يمكن التعرف عليها، الأمر الذي يتمشى مع المعتقدات التي أرساها الإغريق وأطلقوا عليها اسم ذرات - أي غير قابلة للانقسام. ارتبط هذا الاسم بالذرات مع أن التاريخ قد أظهر خطأ ذلك، حيث اتضح أن الذرات "قابلة للانقسام". وقد أرست أبحاث كل من طومسون وإرنست رذرفورد ونيلز بوهر وجيمس تشادويك في بداية الثلاثينيات من القرن العشرين نموذجاً للذرة يماثل النظام الشمسي، الأمر المألوف لمعظمنا. وتتكون الذرات - التي صارت أبعد ما تكون عن كونها مادة أولية - من أنوية تحتوي على بروتونات ونيوترونات محاطة بحشد من الإلكترونات في مداراتها.

ولفترةٍ ما اعتقد كثير من علماء الفيزياء أن البروتونات والنيوترونات والإلكترونات هي الذرات "الإغريقية". غير أنه في العام 1968، وفي مركز المعجل الخطِّي في ستانفورد، وباستغلال الإمكانات المتطورة لتقنية اختبار أغوار المادة، وجد العلماء التجريبيون أن البروتونات والنيوترونات ليست أولية هي الأخرى. وأثبتوا أن كلاً من البروتونات والنيوترونات تتكون من ثلاثة جسيمات أصغر تسمى كواركات (Quarks) - وهو اسم غريب اقتبسه موراي جيل - مان عالم الفيزياء النظرية من مقطع في رواية جيمس جويس "السهر بجانب جثمان فينيغان" Finnegan's Wake لأنه كان يظن أن هذه الجسيمات موجودة. كما أنهم أثبتوا أن الكواركات نفسها تجيء على نوعين، أطلقوا عليهما - بلا فلسفة - صفتي "أعلى" و"أسفل". ويتكون البروتون من كواركين اثنين من نوع "أعلى"، وكوارك واحد من نوع "أسفل"، بينما يتكون النيوترون من كواركين "أسفل" وكوارك واحد "أعلى".

ويبدو أن كل ما نشاهده في عالمنا الأرضي أو السماوي مصنوع من اتحاد الإلكترونات والكواركات العليا والكواركات السفلى. ولا يوجد أي دليل تجريبي على أن أياً من هذه الجسيمات الثلاثة يتكون من مكونات أصغر. غير أن هناك العديد من الدلائل التي تشير إلى أن العالم نفسه به مكونات معينة أخرى. وقد اكتشف فريدريك راينز (Frederick Reins) وكلايد كوان (Clyde Cowan) في منتصف الخمسينيات من القرن العشرين أدلة تجريبية حاسمة على وجود جسيمة أساسية رابعة أطلقا عليها "نيوترينو" Neutrino، وكان وولفغانغ باولي قد تنبأ بوجودها في بداية الثلاثينيات من القرن العشرين. أثبتت النيوترينو أنها جسيمة شبح من الصعب الكشف عنها لأنها من النادر أن تتداخل مع المواد الأخرى. فمثلاً تستطيع جسيمة نيوترينو متوسطة الطاقة أن تعبر خلال تريليونات الأميال من فلز الرصاص من دون أن تتأثر حركتها ولو بصورة ضئيلة جداً. ولا بد أن تشعر براحة لأنه في الوقت الذي تقرأ فيه هذه الجملة تعبر جسدك، وتعبر الأرض كذلك، بلايين من جسيمات النيوترينو التي اندفعت إلى الفضاء من الشمس كجزء من رحلتها المتفردة خلال الكون. وقد اكتشفت جسيمة أخرى في نهاية الثلاثينيات من القرن العشرين، هي "الميون" Muon، وهي جسيمة مثل الإلكترون، إلا أنها أثقل منه مائتي مرة. وقد اكتشفها علماء الفيزياء أثناء دراستهم للأشعة الكونية (سيل من الجسيمات التي تنهمر على الأرض من الفضاء الخارجي). وحيث أنه لم تكن هناك في النظام الكوني معضلة أو ظروف مناسبة تستدعى وجود جسيمات الميون، لذلك تلقى عالم فيزياء الجسيمات إيزيدور إسحق رابي (Isidor Isaac Rabi)، الحاصل على جائزة نوبل، اكتشاف الميون بفتور قائلاً: "من الذي أمر بهذه الجسيمة"، ومع ذلك كانت موجودة، وكان هناك المزيد بعدها.

وباستخدام تقانة متزايدة المقدرة، واصل الفيزيائيون دفع قطع من المادة بعضها مع بعض بطاقة متزايدة لتحدث ظروفاً لحظية غير مسبوقة منذ الانفجار الهائل (Big Bang). وكانوا يبحثون في الشظايا عن مكونات أساسية جديدة يضيفونها إلى قائمة الجسيمات التي كان يتزايد عددها باستمرار. وفي ما يلي ما اكتشفوه: أربعة كواركات أخرى، الفتنة Charm، والغريب Strange، والقاع Bottom، والقمة top، وكذلك قريب آخر للإلكترون لكنه أثقل منه أطلق عليه اسم "تاو" Tau، وكذلك جسيمتان أخريان لهما خواص تشابه النيوترينو (أطلق عليهما ميون نيوترينو Muon-Neutrino، وتاو نيوترينو Tau-Neutrino – للتفرقة بينهما وبين النيوترينو الأصلية التي أصبح اسمها إلكترون – نيوترينو). وتنتج هذه

الجسيمات من تصادمات عالية الطاقة وتتواجد كالأشباح في لحظات ولا تدخل فى تكوين أي شيء من الأشياء التي نتعامل معها، لكن هذا ليس نهاية المطاف. فلكل من هذه الجسيمات جسيمة مضادة مرافقة. والجسيمات المضادة لها نفس كتلة الجسيمة، لكنها تختلف في بعض الأمور المعينة الأخرى مثل الشحنة الكهربية (كذلك شحنتها بالنسبة لقوى أخرى سنأتي على ذكرها في ما بعد). فمثلاً الجسيمة المضادة للإلكترون تسمى البوزيترون. ولها نفس كتلة الإلكترون تماماً لكن شحنتها موجبة +1 بينما شحنة الإلكترون سالبة -1. وعندما تلتقي المادة والمادة المضادة فإن كلاً منهما يلاشي الآخر لتنتج طاقة بحتة. ولذا لا توجد المادة المضادة في الطبيعة حولنا إلا في ما ندر.

تمكن الفيزيائيون من التعرف على نسق لهذه الجسيمات مبين في الجدول رقم (1-1). وتقع جسيمات المادة في ثلاث مجموعات، غالباً ما يطلق عليها عائلات (Families). وتحتوي كل عائلة على كواركين اثنين وإلكترون أو أحد أقاربه، وواحدة من مجموعة النيوترينو. وتمتلك الجسيمات المقابلة في العائلات الثلاث خواص متطابقة ما عدا الكتلة، التي تزداد من عائلة إلى أخرى. وخلاصة القول أن علماء الفيزياء قد اختبروا بنية المادة حتى وصلوا إلى أبعاد تقترب من جزء من البليون من جزء من البليون من المتر وبينوا أن كل الأشياء التي نتعامل معها اليوم سواء كانت طبيعية أم مصنعة نتيجة تصادمات بذرات عملاقة، كل هذه المواد تتكون من اتحاد بعض الجسيمات من العائلات الثلاث ومن جسيماتها المضادة.

ونظرة خاطفة على الجدول رقم (1-1) تتركك من دون شك متفقاً مع رابي Rabi فى حيرته حيال اكتشاف الميون. وقد أعطى تنسيق الجسيمات على شكل عائلات بعض النظام والترتيب، ولكنه أوجد عدداً لا يحصى من التساؤلات الملحة من نوع لماذا؟. لماذا يوجد هذا العدد الكبير من الجسيمات الأساسية وبالذات عندما يبدو أن الغالبية العظمى من الأشياء في العالم من حولنا لا تحتاج إلا للإلكترونات والكواركات العليا والكواركات السفلى؟ لماذا توجد ثلاث عائلات؟ ولماذا لا توجد عائلة واحدة أو أربع عائلات أو أي عدد آخر منها؟ ولماذا تملك هذه الجسيمات كتلة مختلفة عشوائية؟ ولماذا مثلاً تزن الجسيمة تاو حوالي 3520 مرة أثقل من الإلكترون؟ لماذا تزن كواركات القمة 40200 مرة أثقل من الكواركات العليا؟ وهذه أمثلة فقط للعشوائية العددية الظاهرية. فهل حدث ذلك بالصدفة، أم باختيار إلهي، أم هل هناك تفسير علمي شامل لهذه السمات الأساسية لعالمنا؟

الجدول رقم (1-1)

العائلة الأولى		العائلة الثانية		العائلة الثالثة	
الجسيمة	الكتلة	الجسيمة	الكتلة	الجسيمة	الكتلة
إلكترون	00054	ميون	11	تاو	109
إلكترون - نيوترينو	$<10^{-8}$	ميون - نيوترينو	$<.0003$	تاو - نيوترينو	$<.033$
كوارك أعلى	.0047	كوارك أنيق	1.6	كوارك قمة	189
كوارك أسفل	0.0047	كوارك غريب	16	كوارك قاع	5.2

العائلات الثلاث للجسيمات الأساسية وكتلتها (كمضاعفات لكتلة البروتون). وما زالت كتلة النيوترينو تراوغ عملية قياسها تجريبياً.

ثالثاً: القوى، أو أين الفوتون؟

تصبح الأشياء أكثر تعقيدا فقط عندما نتعامل مع قوى الطبيعة. العالم من حولنا مفعم بوسائل إظهار التأثيرات المختلفة، فالكرة تضرب بالمضارب، ويلقي المتحمسون المندفعون بأنفسهم من حالق في اتجاه الأرض، كذلك تستطيع المغناطيسات الاحتفاظ بقطار فائق السرعة على ارتفاع قليل من القضبان الفلزية، وتصدر عدادات جايجر نبضات كرد فعل للمواد المشعة، وتنفجر القنابل النووية. ويمكن التأثير على الأشياء بدفعها أو شدها أو هزها بعنف، أو بقذف أو إطلاق أشياء أخرى عليها، أو بواسطة مطها أو ليِّها أو طحنها أو تجميدها أو تسخينها أو حرقها. وقد جمَّع الفيزيائيون خلال المائة سنة الماضية تلالاً من الأدلة التي أكدت أن كل التداخلات بين الأجسام والمواد المختلفة، وكذلك ملايين وملايين أخرى من الأمور التي نتعامل معها يومياً، يمكن اختزالها إلى مجموعة من أربع قوى أساسية. والجاذبية هي إحدى هذه القوى. أما الثلاث الأخريات فهي القوى الكهرومغناطيسية والقوى الضعيفة والقوى القوية.

وأكثر هذه القوى شيوعاً هي الجاذبية، فهي المسؤولة عن وجودنا في مدار حول الشمس، وعن استقرار أقدامنا على الأرض. وتعبر كتلة الجسم عن مقدار ما تبذله من جاذبية ومقدار ما يقع عليها منها. والقوى التي تلي الجاذبية شيوعاً هي الكهرومغناطيسية، وهي القوى التي تقف وراء كل مظاهر الرفاهية في العصر

الحديث مثل الأضواء والحاسبات وأجهزة التليفزيون والتليفونات. كما أنها وراء صواعق البرق العظمى واللمسة الرقيقة ليد إنسان. وعلى المقياس الميكروسكوبي فإن الشحنة الكهربية للجسيمة تلعب دوراً في القوى الكهرومغناطيسية يماثل دور الكتلة في حالة الجاذبية: فهي تحدد مدى ما تبذله الجسيمة ومدى رد فعلها كهرومغناطيسياً.

والقوى القوية والقوى الضعيفة أقل ألفة لأن تأثيرها يتضاءل بسرعة خلال المسافات، ما عدا المسافات تحت الذرية، وهي القوى النووية، ولهذا السبب لم تكتشف تلك القوى إلا حديثاً. والقوى القوية هي المسؤولة عن "تماسك" الكواركات بعضها مع بعض في البروتونات والنيوترونات والاحتفاظ بالبروتونات والنيوترونات محشورة بعضها مع بعض داخل أنوية الذرات. أما القوى الضعيفة فهي المعروفة بأنها المسؤولة عن التفتت الإشعاعي لمواد مثل اليورانيوم والكوبلت.

وقد اكتشف الفيزيائيون خلال القرن الماضي سمتين عامتين لكل هذه القوى. السمة الأولى (كما سنرى في الفصل الخامس) وعلى المستوى الميكروسكوبي هي أن كل هذه القوى لها جسيمة مترافقة معها يمكن اعتبارها الحزمة الصغرى لهذه القوى. فإذا أطلقنا شعاعاً من الليزر - "مدفع أشعة كهرومغناطيسية" - فإننا في الواقع نطلق تياراً من الفوتونات، وهي الحزمة الصغرى للقوى الكهرومغناطيسية. أما المكونات الصغرى لمجالات القوى الضعيفة والقوى القوية، فهي جسيمات تسمى بوزونات قياسية ضعيفة Weak Gauge Boson، وغليونات Gluons (ويمكن اعتبار كلمة غليون معبرة بالتحديد، فالغليونات تعتبر المكون الميكروسكوبي في الغراء القوي الذي يمسك الأنوية الذرية بعضها مع بعض). وبحلول عام 1984، تمكن العلماء التجريبيون من تأكيد وجود هذه الأنواع الثلاثة من جسيمات القوى، ومن تعيين خواصها بالتفصيل كما هو مبين في الجدول رقم (1-2). ويعتقد علماء الفيزياء بوجود جسيمة مرافقة لقوى الجاذبية كذلك، أطلقوا عليها اسم غرافيتون Graviton، إلا أنهم لم يتحققوا من وجودها تجريبياً حتى الآن.

أما السمة المشتركة الثانية لهذه القوى فإنها مثل الكتلة في تحديدها كيف تؤثر الجاذبية في الجسيمات، وكذلك مثل الشحنة الكهربية في تحديدها كيف تؤثر القوى الكهرومغناطيسية فيها. وتمتلك الجسيمات هنا كميات معينة من "شحنة قوية" و"شحنة ضعيفة"، وهي الشحنات التي تحدد كيف تتأثر بالقوى القوية والقوى الضعيفة. (هذه الخواص موجودة بالتفصيل في الملاحظات الموجودة آخر

هذا الفصل(1). ولكن، وكما في حالة كتلة الجسيمات، وإذا تغاضينا عن حقيقة أن علماء الفيزياء التجريبيين قد قدروا بدقة تلك الخواص، فإنه لا يوجد أي تفسير لماذا يتكون عالمنا من هذه الجسيمات وبهذه الكتلة وشحنات القوى بالتحديد.

(1) الجدول الآتي توضيح للجدول رقم (1-1)، وهو يسجل كتل وقوى الشحنات للجسيمات في كل العائلات الثلاث. ويمكن أن يحمل كل نوع من الكواركات ثلاث شحنات من القوى القوية، والتي يمكن بشيء من الخيال أن توسم بالألوان - وهي تشير إلى قيم عددية لشحنات من القوى القوية. أما الشحنات الضعيفة المسجلة فهي، بصورة أكثر دقة، "المكون الثالث" لنفس الحركة المغزلية الضعيفة (**Weak Isospin**). (ولم نسجل هنا مكونات الجسيمات ذات خاصية "اليد اليمنى" - لأنها تختلف في كونها لا تملك شحنة ضعيفة).

العائلة الأولى				
الجسيمة	**الكتلة**	**الشحنة الكهربية**	**الشحنة الضعيفة**	**الشحنة القوية**
إلكترون	00054	-1	$^{1}/_{2}-$	0
إلكترون-نيوترينو	$< 10^{-8}$	0	$^{1}/_{2}$	0
كوارك أعلى	0047	$^{2}/_{3}$	$^{1}/_{2}$	أحمر، أخضر، أزرق
كوارك أسفل	0047	$-^{1}/_{3}$	$-^{1}/_{2}$	أحمر، أخضر، أزرق
العائلة الثانية				
الجسيمة	**الكتلة**	**الشحنة الكهربية**	**الشحنة الضعيفة**	**الشحنة القوية**
ميون	11	-1	$-^{1}/_{2}$	0
ميون - نيوترينو	<0003	0	$^{1}/_{2}$	0
الكوارك الأنيق	1.6	$^{2}/_{3}$	$^{1}/_{2}$	أحمر، أخضر، أزرق
الكوارك الغريب	16	$-^{1}/_{3}$	$-^{1}/_{2}$	أحمر، أخضر، أزرق
العائلة الثالثة				
الجسيمة	**الكتلة**	**الشحنة الكهربية**	**الشحنة الضعيفة**	**الشحنة القوية**
تاو	1.9	-1	$-^{1}/_{2}$	0
تاو-نيوترينو	<033	0	$^{1}/_{2}$	0
كوارك القمة	189	$^{2}/_{3}$	$^{1}/_{2}$	أحمر، أخضر، أزرق
كوارك القاع	5.2	$-^{1}/_{3}$	$-^{1}/_{2}$	أحمر، أخضر، أزرق

الجدول رقم (1-2)

القوة	جسيمة القوة	الكتلة
قوية	غليون Gluon	0
كهرومغناطيسية	فوتون Photon	0
ضعيفة	بوزونات قياسية ضعيفة Weak Gauge Bosons	86,97
الجاذبية	غرافيتون	0

القوى الأربع في الطبيعة مع جسيمات القوة المرافقة لها وكتلتها كمضاعفات لكتلة البروتون. (تجيء جسيمات القوة الضعيفة على أنواع ذات كتلتين محتملتين كما هو مذكور في الجدول. وتبين الدراسات النظرية أنه لابد أن يكون الغرافيتون عديم الكتلة).

وعلى الرغم من سماتها العامة، فإن دراسة القوى الأساسية نفسها لم تأت إلا بمزيد من الأسئلة. فمثلاً، لماذا توجد أربع قوى أساسية؟ ولماذا ليست خمساً أو ثلاثاً أو واحدة فقط؟ ولماذا تتباين خواص هذه القوى بهذا الشكل؟ ولماذا ينحصر تأثير القوى الضعيفة والقوية فقط في المستوى الميكروسكوبي، بينما مجال قوى الجاذبية والكهرومغناطيسية غير محدود؟ ولماذا هذا الانتشار الواسع للشدة الذاتية لهذه القوى؟

ولكي ندرك ما يعنيه هذا السؤال، لنتخيل أننا نقبض على إلكترون باليد اليسرى وآخر باليد اليمنى، وسنحاول تقريب هاتين الجسيمتين المتماثلتين تماماً في الشحنة إحداهما من الأخرى. ستشجع قوى الجاذبية الجمع بينهما بينما سيقوم التنافر الكهرومغناطيسي بمحاولة إبعادهما الواحدة عن الأخرى. ترى أيهما الأقوى؟ ليس هناك مجال للمنافسة، فقوى التنافر الكهرومغناطيسية أقوى بحوالي مليون بليون بليون بليون بليون مرة (10^{42} مرة). فإذا كانت المسافة بين رأسَيْ العضلة في أعلى الزند الأيمن تمثل شدة قوى الجاذبية، فإن المسافة بين رأسي العضلة في أعلى الزند الأيسر لابد أن تتسع لتملأ الكون أو أبعد من ذلك لتمثل شدة القوى الكهرومغناطيسية. والسبب الوحيد في أن القوى الكهرومغناطيسية لا تطغى على الجاذبية في العالم من حولنا هو أن معظم الأشياء تتكون من كميات متساوية من الشحنات الكهربية السالبة والموجبة، الأمر الذي يؤدي إلى تلاشٍ متبادل لقوتيهما. ومن ناحية أخرى، وحيث إن الجاذبية قوى جذب دائماً، فلا

مجال لإلغائها . أي أن الزيادة في المادة تعني زيادة قوى الجاذبية. ويمكن القول أن قوى الجاذبية في الأساس في غاية الضعف. (وتقف هذه الحقيقة وراء عدم التمكن من إثبات وجود الجرافيتون. ويمثل البحث عن أصغر حزمة من أضعف القوى تحدياً حقيقياً). وقد أثبتت التجارب أن القوى القوية أقوى من القوى الكهرومغناطيسية بحوالى مائة مرة وأقوى من القوى الضعيفة بحوالى مائة ألف مرة. لكن أين المنطق هنا - أو سبب الوجود - في أن عالمنا له هذه السمات؟

وليس هذا التساؤل مجرد فلسفة عديمة الجدوى حول السبب وراء حدوث تفاصيل معينة بشكل ما وليس بشكل آخر؛ فسيصبح العالم مكاناً مختلفاً جدا إذا تغيرت خواص المادة وجسيمات القوى ولو تغيراً طفيفاً. وعلى سبيل المثال، فإن وجود أنوية مستقرة لحوالي مائة عنصر في الجدول الدوري يتوقف تماماً على النسبة بين شدة القوى القوية والقوى الكهرومغناطيسية. فالبروتونات المحشورة معاً في أنوية الذرات تتنافر جميعاً بعضها مع بعض بفعل القوى الكهرومغناطيسية، لكن ولحسن الحظ فإن القوى القوية بين الكواركات المكونة لها تتغلب على هذا التنافر وتقيد البروتونات بعضها إلى بعض بشدة. لكن أي تغير طفيف في الشدة النسبية بين هاتين القوتين قد يؤدي بسهولة إلى اضطراب في التوازن بينهما، الأمر الذي قد يتسبب في تفكك معظم الأنوية. وعدا ذلك، لو كانت كتلة الإلكترونات أكبر بضع مرات مما هي عليه، فإنها ستتحد مع البروتونات لتكون نيوترونات لتلتهم أنوية الهيدروجين (أبسط العناصر في الكون، وتتكون نواته من بروتون واحد)، ومرة أخرى، سيضطرب إنتاج العناصر الأكثر تعقيداً. وتعتمد النجوم على دمج الأنوية المستقرة، وعليه فإن هذه النجوم لن تتواجد إذا حدث مثل هذا التدخل في أساسيات الفيزياء. وتلعب شدة الجاذبية هي الأخرى دوراً فعالاً. وتقوم الكثافة الساحقة للمادة في لب قلب النجم بقدح الفرن النووي، وهي التي تقف وراء تألق أضواء النجم. فإذا كانت شدة الجاذبية أكثر مما هي عليه فإن تجمع المادة داخل النجم سيتم بصورة أقوى مما سيزيد من سرعة التفاعلات النووية بشكل ملحوظ. تماماً مثل اللهب عندما يتوهج بشدة فإن وقوده سينفد بسرعة إذا ما قورن بشمعة تشتعل ببطء، وكذلك التفاعل النووي إذا زادت سرعته فسيتسبب في أن نجوما مثل الشمس ستحترق بمعدلات أسرع كثيراً مما سيحدث تأثيراً مدمراً في الحياة كما نعرفها. ومن ناحية أخرى، إذا نقصت شدة الجاذبية بشكل ملحوظ فلن تتجمع المادة كليةً، وبالتالي سيمنع ذلك تكوُّن النجوم والمجرات.

ويمكن أن نسترسل أكثر من ذلك لكن الفكرة واضحة الآن: فالعالم هو ما

هو لأن المادة وجسيمات القوى لها من الخواص ما لها. لكن هل هناك تفسير علمي يقول لنا لماذا هذه الخواص؟

رابعاً: نظرية الأوتار: الفكرة الأساسية

تقدم نظرية الأوتار نموذجاً قوياً مبنياً على الفهم، يتضمن لأول مرة ظهور إطارٍ يجيب عن هذه التساؤلات. ولنبدأ بالفكرة الأساسية.

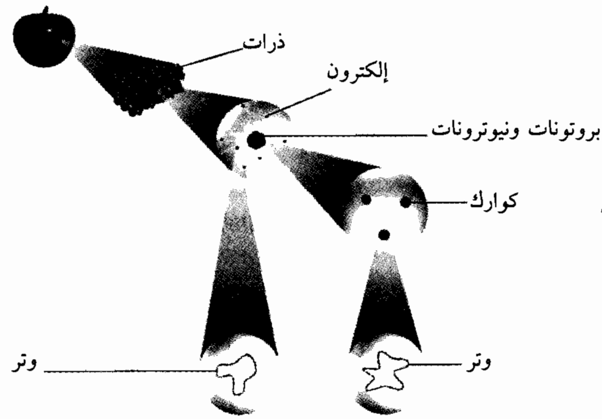
تمثل الجسيمات في الجدول رقم (1-1) "حروف" جميع المواد. وهي في ذلك مثل مثيلاتها في اللغات، فهي تبدو وكأن ليس لها بنية داخلية أبعد من ذلك. وتدعي نظرية الأوتار غير ذلك. فتبعاً لهذه النظرية، فإننا لو فحصنا هذه الجسيمات بدقة أكبر - أي بدقة تزيد أضعافاً مضاعفة، وهي دقة خارج إمكاناتنا التقنية الحالية - فإننا سنجد أن كلاً منها ليس مجرد نقطة، بل يتكون من أنشوطة أحادية البعد. وتتكون كل جسيمة من فتيل يتذبذب ويهتز ويتراقص مثل حلقة من المطاط متناهية النحافة. ولأن علماء الفيزياء يفتقرون إلى حنكة جيل-مان الأدبية، فقد أطلقوا عليها اسم الوتر (String). وفي الشكل رقم (1-1) قمنا بتصوير هذه الفكرة الرئيسية لنظرية الأوتار بدءاً من قطعة عادية من المادة مثل تفاحة، ثم كررنا تكبير بنيتها لنكشف عن مكوناتها بمقاييس متزايدة في الصغر. وتضيف نظرية الأوتار طبقة ميكروسكوبية جديدة لأنشوطة متذبذبة إلى ما كان معروفاً مسبقاً في التسلسل من ذرات إلى بروتونات ونيوترونات وإلكترونات وكواركات[2].

وعلى الرغم من عدم الوضوح بأي شكل من الأشكال، إلا أننا سنرى في الفصل السادس أن الإحلال البسيط لمفهوم الجسيمة-النقطة في مكونات المادة بواسطة الأوتار ينهي عدم التوافق بين ميكانيكا الكم والنسبية العامة. وبذلك تمكنت نظرية الأوتار من حل العقدة مستعصية الحل المركزية في الفيزياء النظرية المعاصرة. وهذا إنجاز هائل إلا أنه جزء واحد فقط من السبب وراء مثل هذه الإثارة التي أحدثتها نظرية الأوتار.

---

(2) يمكن أن يكون للأوتار نهايتان حرتا الحركة (تدعى الأوتار المفتوحة) بالإضافة إلى العروات (الأوتار المغلقة) والمصورة في الشكل رقم (1-1). ولتسهيل ما نعرضه سنركز في معظم الأحيان على الأوتار المغلقة، مع أن كل ما سنذكره ينطبق على كليهما.

الشكل رقم (1-1)



تتكون المادة من ذرات، هي بدورها تتكون من كواركات وإلكترونات. وتبعاً لنظرية الأوتار فإن كل هذه الجسيمات هي في الواقع أنشوطات دقيقة لأوتار متذبذبة.

خامساً: نظرية الأوتار كنظرية موحدة لكل شيء

مع أن القوى القوية والقوى الضعيفة لم تكن قد اكتشفت بعد في أيام آينشتاين، إلا أن وجود قوتين فقط متميزتين الواحدة من الأخرى (الجاذبية والكهرومغناطيسية) كان أمراً محيراً بشدة. لم يقبل آينشتاين فكرة أن الطبيعة قد قامت على مثل هذا التصميم الغريب. وقد حفز ذلك رحلة آينشتاين على مدى ثلاثين عاماً في البحث عما أسماه نظرية المجال الموحد (Unified Field Theory)، وكان يأمل أن تثبت أن هاتين القوتين هما في الحقيقة نتاج مبدأ واحد عظيم. وقد عزلت هذه المشكلة الدونكيغوتية آينشتاين عن التيار الرئيسي للفيزياء، الذي كان مشغولاً وقتها وبحق في البحث العميق في الإطار الذي بزغ حديثا لميكانيكا الكم. وقد كتب لأحد أصدقائه في بداية الأربعينيات من القرن العشرين: "لقد أصبحت شخصاً وحيدا عجوزاً ومعروفاً فقط لأنه لا يرتدي جوارب، والذي يُقدِّم في مناسبات خاصة كشخص غريب الأطوار[3]".

كان آينشتاين سابقاً لعصره. فبعد أكثر من نصف قرن أصبح حلمه عن النظرية الموحدة هو الكأس المقدسة للفيزياء الحديثة. واليوم أصبح قسم كبير من مجتمع الفيزياء والرياضيات مقتنعاً بشكل متزايد بأن نظرية الأوتار قد تعطي الإجابة.

---

(3) ألبرت آينشتاين في خطاب إلى صديق 1942، كما هو مقتبس من كتاب: Tony Hey and Patrick Walters, *Einstein's Mirror* (Cambridge, MA: Cambridge University Press, 1997).

وانطلاقاً من مبدأ واحد - هو أن كل شيء على أصغر المستويات الميكروسكوبية يتكون من تجمع جدائل متذبذبة - فإن نظرية الأوتار تزودنا بإطار مفردٍ للتفسير قادرٍ على احتواء كل القوى وكل المادة.

وعلى سبيل المثال، فإن نظرية الأوتار تدعي أن ما نشاهده من خواص الجسيمات - الموجزة في الجدولين رقمي (1-1)، و(1-2) هي مجرد انعكاس للطرق المختلفة التي يمكن أن يتذبذب بها الوتر. وتماماً مثل أوتار الكمان أو البيانو التي لها ترددات تتذبذب عندها فقط - أنساق تشعر بها آذاننا كنوتة موسيقية بإيقاعاتها - كذلك حال الأنشوطات في نظرية الأوتار. غير أننا سنرى، أنه بدلاً من إنتاج نوتة موسيقية، فإن كل نسق من ذبذبات الأوتار في نظرية الأوتار يظهر على شكل جسيمة تتحدد كتلتها وقوة شحنتها بواسطة نسق اهتزازات الوتر. والإلكترون وتر يتذبذب بطريقة واحدة، أما الكوارك الأعلى فهو وتر يتذبذب بطريقة أخرى، وهكذا. وبعيداً عن كونها مجموعة من الحقائق التجريبية المشوشة، فإن خواص الجسيمات في نظرية الأوتار ما هي إلا إظهار لسمة فيزيائية واحدة لا تتغير: الأنساق الرنينية للتذبذب - الموسيقى إذا صح التعبير - للأنشوطات الأساسية للوتر. وتنطبق نفس الفكرة أيضاً على قوى الطبيعة. وسنرى أن جسيمات القوى هي الأخرى تترافق مع أنساق محددة لاهتزازات وترية، وعليه فإن كل شيء، كل المادة وكل القوى، تتوحد تحت نفس العنوان: الاهتزازات الميكروسكوبية - النوتة التي يمكن أن تعزفها الأوتار.

ولأول مرة في تاريخ الفيزياء، أصبحنا نمتلك إطاراً له المقدرة على تفسير كل السمات الأساسية التي يقوم عليها بناء العالم. ولهذا السبب توصف نظرية الأوتار أحياناً بأنها قد تكون "نظرية كل شيء" (T.O.E. Theory of Everything)، أو "النظرية النهائية" "Ultimate"، أو "الأخيرة" "Final". وقد قصدت هذه المصطلحات الرنانة أن تظهر أكثر النظريات عمقاً في الفيزياء النظرية التي تصلح أساساً لكل النظريات الأخرى، وهي النظرية التي لا تتطلب ولا حتى تسمح بوجود تفسير أعمق. وعملياً، يتخذ الكثير من العلماء النظريين في نظرية الأوتار موقفاً أكثر تواضعاً، ويفكرون في نظرية كل شيء ".T.O.E" بشكل محدود كنظرية يمكن أن تفسر خواص الجسيمات الأساسية وخواص القوى التي تتداخل وتؤثر فيها هذه الجسيمات بعضها في البعض الآخر. ويستطيع أي اختزاليّ وفيّ أن يزعم أن هذا الشكل ليس محدوداً، وأنه من ناحية المبدأ يمكن وصف كل شيء - من الانفجار الهائل Big Bang حتى أحلام اليقظة - بواسطة العمليات الفيزيائية الميكروسكوبية والمتضمنة للمكونات الأساسية للمادة. ويجادل الاختزاليون مدعين

أنك لو فهمت كل شيء عن المكونات فإنك ستفهم كل شيء.

وتستطيع فلسفة الاختزاليين أن تثير حرارة الجدل بسهولة. ويجد الكثيرون أن من البلاهة والحمق الادعاء بأن عجائب الحياة والعالم ليست إلا مجرد انعكاسات لجسيمات ميكروسكوبية منهمكة في رقصات لا هدف لها، تقودها في ذلك قوانين الفيزياء. ترى هل الشعور بالفرح والحزن والملل هو في الحقيقة تفاعلات كيميائية في الدماغ . تفاعلات بين الجزيئات والذرات وعلى مستوى أكثر ميكروسكوبية، تفاعلات بين بعض الجسيمات الواردة في الجدول رقم (1-1)، والتي هي في الحقيقة مجرد أوتار تتذبذب؟ وكرد فعل على هذا الاتجاه النقدي حذر ستيفن وينبرغ في "أحلام النظرية الأخيرة" قائلاً:

"وفي نهاية الطرف الآخر يوجد المعادون للاختزالية والمنزعجون لما يشعرون به تجاه التجريد في العلوم الحديثة. ولأي مدى يمكن أن يُختزلوا هم وعالمهم إلى مادة من الجسيمات أو المجالات وتفاعلاتها، وقد شعروا بالتقزيم نتيجة لهذه المعرفة.... ولن أحاول أن أرد على هذا النقد بحديث منمق عن أوجه الجمال في العلوم الحديثة. ورؤية الاختزاليين للعالم باردة وعامة. وعلينا أن نتقبلها كما هي، ليس لأننا معجبون بها، ولكن لأنه هكذا يعمل العالم"(4).

يتفق البعض مع هذا الرأي المتصلب، والبعض يختلف.

وقد حاول البعض الآخر أن يجادل حول كون التطورات، مثل نظرية العشوائية (Chaos Theory)، تبين أن أنواعاً جديدة من القوانين تدخل اللعبة عندما يزداد مستوى تعقيد النظام. وإذا كان إدراك سلوك الإلكترون أو الكوارك يمثل شيئاً ما، فإن استخدام هذه المعرفة لفهم سلوك الإعصار شيء آخر تماماً. ويتفق معظم الناس حول هذه النقطة. غير أن الآراء تتباين حول ما إذا كانت الظواهر المتنوعة وغير المتوقعة غالباً التي قد تحدث في أنظمة أكثر تعقيداً من الجسيمات المنفردة - هي حقاً مبادئ جديدة فاعلة في الفيزياء، أو أن المبادئ المعنية مشتقة من مبادئ الفيزياء التي تحكم العدد الهائل من المكونات الأولية ومعتمدة عليها، وإن كان ذلك يحدث بطريقة معقدة للغاية. أما شعوري الخاص فهو أنها لا تمثل قوانين فيزيائية جديدة أو مستقلة. ومع أنه من الصعب أن نفسر خواص الإعصار انطلاقاً من فيزياء الإلكترونات والكواركات، إلا أنني أرى في ذلك مجرد مأزق حسابي وليس مؤشراً على الحاجة إلى قوانين فيزيائية جديدة. لكن مرة أخرى هنالك من لا يتفق مع هذه الرؤية.

(4) انظر: Steven Weinberg, *Dreams of a Final Theory* (New York: Panthon, 1992), p. 52.

وما لا مجال إطلاقاً للتساؤل بصدده، وما هو في الدرجة الأولى من الأهمية للرحلة الموصوفة في وصف رحلتنا هذا الكتاب، حتى إذا تقبل المرء المنطق القابل للنقاش للاختزاليين الأوفياء، فإن المبادئ شيء، والتطبيق العملي شيء آخر تماماً. ويتفق الكل تقريباً حول فكرة أن نظرية كل شيء (T.O.E.) لا يمكن بأي حال أن تحل مشاكل علم النفس والبيولوجيا والجيولوجيا والكيمياء، بل وحتى الفيزياء، أو حتى أن تصنف هذه العلوم بشكل ما. والعالم مكان رائع الثراء ومعقد لدرجة أن اكتشاف النظرية النهائية بالشكل الذي وصفناه هنا لا يعني نهاية العلم، بل على العكس تماماً: فاكتشاف نظرية كل شيء (T.O.E.) - التفسير النهائي للعالم في أقصى مستوياته الميكروسكوبية، أو النظرية التي لا تقوم على أي تفسير أعمق - قد يزودنا بأصلب الأسس التي يمكن أن نبني عليها فهمنا للعالم. فاكتشافها قد يمثل البداية وليس النهاية. وقد تزودنا النظرية النهائية بدعامة لا تهتز من تماسك أبدي يؤكد لنا أن العالم مكان مفهوماً

سادساً: حالة نظرية الأوتار

يمثل تفسير وظائف العالم تبعاً لنظرية الأوتار الاهتمام الرئيسي في هذا الكتاب، مع التأكيد المبدئي على الانعكاسات التي يُحدثها هذا التفسير لمفهومنا عن المكان والزمان. وعلى عكس عروض كثيرة أخرى للتطورات العلمية، فإن ما هو معروض هنا لا يمثل في حد ذاته نظرية مكتملة تماماً، تأكدت باختبارات تجريبية قوية ومقبولة كلياً من مجتمع العلماء. والسبب وراء ذلك، كما سنعرض له في فصول تالية، هو أن نظرية الأوتار بناء نظري عميق ورفيع المستوى، وحتى في ضوء التقدم المؤثر الذي تم خلال العقدين الأخيرين، ما زال هناك الكثير قبل أن ندعي أننا قد توصلنا إلى السيطرة الكاملة عليه.

بناء على ذلك، فإن نظرية الأوتار تمثل عملاً ما زال في مرحلة التطور، وأن ما تم جزئياً منه قد أظهر بالفعل أموراً مدهشة في طبيعة المكان والزمان والمادة. والنجاح الأعظم هنا هو التوافق بين النسبية العامة وميكانيكا الكم. والأكثر من ذلك، وبخلاف أية نظرية سابقة، فإن نظرية الأوتار تملك المقدرة على الإجابة عن الأسئلة الأولية المتعلقة بأهم مكونات الطبيعة الأساسية والقوى. وللروعة المتميزة لكل من الإجابات والإطار الذي تقترحه نظرية الأوتار لتلك الإجابات نفس الدرجة من الأهمية، مع أن ذلك يصعب شرحه. فمثلاً، لقد وُجد أن هناك في نظرية الأوتار الكثير من سمات الطبيعة التي قد تبدو تفاصيل تقنية اعتباطية - مثل عدد المكونات الأساسية المتميزة للجسيمات وخصائص كل منها - إنما

نشأت من مظاهر جوهرية وملموسة في هندسة الكون. وإذا كانت نظرية الأوتار صحيحة، فإن النسيج الميكروسكوبي لعالمنا عبارة عن متاهة متعددة الأبعاد مجدولة بغزارة، تتذبذب وتلتوي داخلها أوتار العالم بشكل لا نهائي، وفي إيقاع متناغم يلفظ قوانين الكون. وبعيداً عن كونها تفاصيل اعتباطية، فإن خواص قوالب بناء الطبيعة الأساسية تتشابك بعمق مع نسيج المكان والزمان.

وفي النهاية، لا يمكن أن يحل شيء محل التنبؤات المحددة القابلة للاختيار والتي يمكن أن تحدد ما إذا كانت نظرية الأوتار قد أزالت بصدق قناع الغموض الذي يخبئ أعمق الحقائق عن عالمنا أم لا. وقد يمضي بعض الوقت قبل أن يبلغ مستوى فهمنا أعماقاً كافية للوصول إلى هذا الغرض، مع أن الاختبارات التجريبية يمكن أن تزودنا بدعم ظرفي لنظرية الأوتار خلال ما يقرب من عشر سنوات - كما سنناقش ذلك في الفصل التاسع . والأكثر من ذلك فإننا سنرى في الفصل الثالث عشر أن نظرية الأوتار قد قامت حديثاً بحل معضلة مركزية تتعلق بالثقوب السوداء، وهي معضلة مرتبطة بأنتروبية بيكينشتاين-هوكنغ (Bekenstein-Hawking)، التي استعصت بعناد على الحل بالطرق التقليدية لأكثر من خمس وعشرين سنة. وقد أقنع هذا النجاح الكثيرين بأن نظرية الأوتار في طريقها لتمنحنا فهماً أعمق للكيفية التي يعمل بها الكون.

ويوجز إدوارد ويتين - أحد الرواد والخبراء المتميزين في نظرية الأوتار - الوضع بقوله "نظرية الأوتار جزء من فيزياء القرن الواحد والعشرين، سقطت صدفة في القرن العشرين"، وهو تقويم أوضحه أول مرة الفيزيائي الإيطالي المرموق دانيال آماتي. وبشكل ما، فإن الأمر يبدو كما لو أننا أعطينا أسلافنا من القرن التاسع عشر حاسباً فائقاً من النوع الحديث من دون أن نعطيهم تعليمات التشغيل. وعن طريق التجربة والخطأ الإبداعي، فإنهم قد يتوصلون إلى تلميحات عن قدرة الحاسب الفائق، لكن ذلك سيتطلب جهوداً عنيفة ومطولة لاكتساب المقدرة على تشغيله. وهذه التلميحات عن إمكانات الحاسب تشبه نظرتنا الخاطفة للمقدرة التفسيرية لنظرية الأوتار، التي كان من الممكن أن تقدم حافزاً في غاية القوة للحصول على الإمكانات الكاملة. وينشط حافز مماثل اليوم جيلاً من علماء الفيزياء النظريين في ملاحقة الفهم التحليلي الشامل والدقيق لنظرية الأوتار.

وتشير ملاحظات ويتين وآخرين من الخبراء في نفس المجال أنه قد تمضي عقود، بل ربما قرون، قبل أن تصبح نظرية الأوتار نظرية تامة ومفهومة. قد يكون ذلك صحيحاً. وفي الحقيقة، فإن رياضيات نظرية الأوتار معقدة لدرجة أن لا أحد اليوم يعلم المعادلات الدقيقة للنظرية. وفي المقابل، فإن علماء الفيزياء يعرفون

هذه المعادلات بالتقريب، وحتى تلك المعادلات المقرَّبة معقدة لدرجة أنها لم تحل إلا جزئياً حتى الآن. ومع ذلك، فإن مجموعة مشجعة من الإنجازات المفاجئة التي حدثت في النصف الثاني من تسعينيات القرن العشرين - الإنجازات التي أجابت عن أسئلة نظرية على درجة تفوق التصور من الصعوبة حتى الآن - قد تشير في الحقيقة إلى أن الفهم الكمي الشامل لنظرية الأوتار أقرب كثيراً مما كان يُعتقد في السابق. ويقوم الفيزيائيون من جميع أنحاء العالم بتطوير تقنيات قوية جديدة للتغلب على طرق التقريب المتعددة المستخدمة حتى الآن. وهم يجمعون معاً العناصر المتباينة في لغز نظرية الأوتار بمعدل متسارع(5).

ومن المدهش أن هذه التطورات تقدم لنا فرصاً جديدة لإعادة تفسير بعض الأوجه الأساسية للنظرية المعروفة لبعض الوقت. فمثلاً من الطبيعي عندما ننظر إلى الشكل رقم (1-1) أن يُثار لدينا السؤال: لماذا الأوتار؟ ولماذا ليست أطباق الهواء الصغيرة (Frisbee Disks)؟ أو كتل صلبة على شكل نقاط ميكروسكوبية؟ أو باقة من كل هذه الاحتمالات؟ وكما سنرى في الفصل الثاني عشر، فإن أحدث الأفكار تبين أن كل هذه الأنواع الأخرى من المكونات لها دور هام في نظرية الأوتار، وأن نظرية الأوتار هي في الواقع جزء من شيء تخليقي أعظم يُسمى حالياً (وبغموض) نظرية -M. وستكون هذه التطورات الأخيرة موضوع الفصول الأخيرة في هذا الكتاب.

ويحدث التقدم في العلوم على شكل نوبات صعود وهبوط. فتمتلئ بعض النوبات بإنجازات مفاجئة هائلة، بينما في أوقات أخرى يعاني الباحثون من ندرة الإنجازات. ويعرض العلماء نتائجهم النظرية والتجريبية، وتتعرض هذه النتائج لمجادلات داخل المجتمع، فأحياناً تستبعد وأحياناً أخرى تخضع للتعديل، وفي بعض الأحيان توحي بآراء ملهمة بارزة لوسائل جديدة أكثر دقة في فهم العالم الفيزيائي. وبمعنى آخر، فإن العلم يتقدم في مسار متعرج تجاه ما نعتقد أنه سيكون الحقيقة النهائية، وهو المسار الذي بدأ مع المحاولات المبكرة للبشرية في معرفة الكون ولا نستطيع التنبؤ بنهايته. ولا نعلم ما إذا كانت نظرية الأوتار هي نقطة بالصدفة على هذا المسار أو أنها نقطة تحول أو أنها في الحقيقة نهاية المطاف. لكن المئات من علماء الفيزياء والرياضيات الذين كرسوا حياتهم للعلم من دول عديدة قد أعطونا أملاً مبنياً على أساس سليم في أننا على الأرجح نسير على الطريق الصحيح والنهائي.

---

(5) مقابلة مع إدوارد ويتن في 11 أيار/ مايو 1998.

إنه ميثاق ذو دلالة على الثراء في طبيعة نظرية الأوتار ومداها البعيد، الذي حتى في مستوى فهمنا الحالي لها قد سمح لنا باكتساب بصيرة جديدة مذهلة في الحالة التي عليها العالم، وهو بمثابة الخيط الرئيسي في ما سيأتي من تطورات تدفع للأمام بثورة مفاهيمنا عن المكان والزمان، التي فجرها آينشتاين في نظريتي النسبية الخاصة والعامة. وسنرى أنه لو كانت نظرية الأوتار صحيحة، فإن نسيج عالمنا له من الخصائص ما كان سيبهر حتى آينشتاين نفسه.

القسم الثاني

مأزق المكان والزمان والكم

الفصل الثاني

المكان والزمان وعين الراصد

في العام 1905 قدم آينشتاين ذو الستة والعشرين ربيعا، مقالة علمية لتنشر في حوليات الفيزياء (Annuals of Physics)، وضع يده فيها على التناقض الخاص بالضوء الذي كان يزعجه مذ بات مراهقاً قبل حوالى عشر سنوات. وعندما وصل محرر المجلة ماكس بلانك إلى الصفحة الأخيرة في هذه المقالة أدرك أنه قد حدث انقلاب على النظام العلمي المتفق عليه، وهكذا وبدون طنطنة أو شنشنة تمكن موظف في مكتب براءات الاختراع في برن بسويسرا من قلب المفاهيم التقليدية عن المكان والزمان رأسا على عقب، وقدم بدلاً منها مفهوماً له خواص تتعارض مع كل شيء كان مألوفاً لنا من خبرتنا العامة.

كان ذلك هو التناقض الذي أزعج آينشتاين على مدى عقد من الزمان. وفي منتصف القرن التاسع عشر نجح الفيزيائي الاسكتلندي جيمس كلارك ماكسويل في توحيد الكهرباء والمغناطيسية في إطار المجال الكهرومغناطيسي، وذلك بعد دراسة مستفيضة للتجارب العلمية التي أنجزها الفيزيائي الإنكليزي ميخائيل فاراداي. وإذا كنت يوماً ما على قمة جبل قبل عاصفة رعدية مباشرة أو وقفت بالقرب من مولد فان دي غراف (Van de Graaf) فسيتولد لديك شعور عميق بما يعنيه المجال الكهرومغناطيسي، لأنك بالفعل قد شعرت به. أما إذا لم تكن هناك، فإن الأمر يشبه إلى حد ما تيار من خطوط القوى الكهربية والمغناطيسية يتخلل المنطقة من الفراغ الذي تعبر فيه. فمثلاً، إذا بذرت برادة الحديد بالقرب من مغناطيس، فإن النسق المنتظم الذي تكونه يشكل مساراً لبعض خطوط القوى المغناطيسية غير المرئية. وعندما تخلع سترة من الصوف في يوم جاف بالذات وتسمع طقطقة أو ربما تشعر بصدمة لحظية أو صدمتين، فإن ذلك دليل وجود خطوط القوى الكهربية التي تتولد عن الشحنات الكهربية المنتقلة من خيوط السترة. وما هو أكثر من اتحاد هاتين الظاهرتين وظواهر أخرى كهربية ومغناطيسية في إطار رياضي واحد، فإن نظرية ماكسويل قد بيّنت - وبشكل غير متوقع تماما - أن الاضطرابات

الكهرومغناطيسية تنتقل بسرعة ثابتة لا تتغير أبداً، وهي السرعة التي اتضح أنها مساوية لسرعة الضوء. ومن هذه النتائج تحقق ماكسويل من أن الضوء المرئي نفسه ليس إلا نوعاً معيناً من الموجات الكهرومغناطيسية، وهي الموجات التي أدركنا الآن أنها تتداخل مع كيماويات شبكية العين لتعطي الشعور بحاسة الإبصار. وقد أظهرت نظرية ماكسويل، بشكل حاسم، أن الموجات الكهرومغناطيسية (ومنها الضوء المرئي) ما هي إلا مثال على مسافر من المشائين لا يتوقف أبدا، ولا يبطئ من خطوته. فالضوء دائما ينتقل بسرعة الضوء.

كل هذا أمر جيد إلى أن نبدأ في التساؤل، كما فعل آينشتاين في سن السادسة عشرة. ما الذي يحدث لو تعقبنا شعاعاً من الضوء، بسرعة الضوء؟ وينبئنا المنطق الحدسي الذي يعتمد على قوانين نيوتن للحركة بأننا سندرك موجات الضوء، وبذا فإنها ستبدو وكأنها ساكنة (بالنسبة لنا): أي سيثبت الضوء في مكانه. ولكن، وطبقا لنظرية ماكسويل وجميع الملاحظات الموثوق بها، فإنه لا يوجد مثل هذا الأمر، أي لا يوجد ضوء ثابت، وببساطة لم يتمكن أحد حتى الآن من الإمساك بحزمة من الضوء في كفه. وهذه هي المعضلة. ولحسن الحظ فإن آينشتاين لم يكن يدري أن كثيراً من علماء الفيزياء الرواد في العالم كانوا يقدحون أذهانهم حول هذه المشكلة (وكانوا في ذلك يسلكون مسارات كثيرة غير منطقية) ويفكرون ملياً في التناقض بين ماكسويل ونيوتن بخصوصية بدائية في أفكارهم الخاصة.

وسنناقش في هذا الفصل كيف تمكن آينشتاين من حل هذا التناقض من خلال نظرية النسبية الخاصة، وهو بذلك يكون قد غيّر وإلى الأبد من مفهومنا للمكان والزمان. وقد يكون مدهشاً أن الاهتمام الأساسي في النسبية الخاصة هو الفهم الدقيق للكيفية التي يبدو عليها العالم للأفراد، والذين غالبا ما يُسمون "الراصدين"، الذين ينتقلون بعضهم بالنسبة لبعض. وقد يبدو ذلك لأول وهلة أنه مجرد تدريب فكري متواضع الأهمية. على العكس تماماً: على يد آينشتاين، وبتخيله للراصدين الذين يركضون وراء أشعة الضوء، فإن هناك تطبيقات مدوية لإدراك الكيفية التي تبدو عليها أكثر المواقف دنيوية بالنسبة للراصدين أثناء حركتهم النسبية.

أولاً: الحدس وعيوبه

تلقي خبرتنا العامة بالضوء على وسائل معينة تتباين فيها ملاحظات مثل هؤلاء

الراصدين. فمثلا تبدو الأشجار على جانبي طريق سريع وكأنها تتحرك من وجهة نظر سائق سيارة، لكنها تبدو ساكنة بالنسبة لمن يقف على جانب الطريق يحاول إيقاف سيارة. وبالمثل، فإن اللوحة الموجودة أمام سائق السيارة تبدو له ساكنة غير متحركة (وهو ما نأمله!)، لكنها مثل باقي السيارة تبدو متحركة بالنسبة لمن يقف على جانب الطريق. ومثل هذه الخواص الأساسية والتلقائية للكيفية التي عليها العالم لا نلاحظها إلا بالكاد.

وتزعم النسبية الخاصة، رغم ذلك، أن الفروق في الملاحظات بين الاثنين (السائق والواقف إلى جانب الطريق) أكثر دقة وحدّة. وتقدم النظرية إعلاناً غريباً يتضمن أن الراصدَيْن للحركة النسبية سيكون لهما تقويم مختلف للمسافة وللزمان. ويعني ذلك، كما سنرى، أنه لو كانت هناك ساعتا يد متماثلتان تماما مع شخصين يتحركان أحدهما بالنسبة للآخر فإن دقات ساعتيهما ستختلف، وبالتالي فلن يتفقا على مقدار الزمن الذي يمضي بين حادثين معينين. وتبين النسبية الخاصة أن هذه المقولة لا تُشَهِّر بدقة الساعتين المعنيتين هنا، لكنها مقولة حقيقية عن الزمن نفسه.

وبالمثل، فإن الراصدين المتحركين بعضهم بالنسبة لبعض والذين يقيسون الزمن لن يحصلوا على نفس النتيجة. ومرة أخرى، لا يرجع ذلك لعدم دقة وسيلة القياس أو خطأ في القياس. وتؤكد أكثر أجهزة القياس دقة في العالم أن المكان والزمان لا يحسهما كل إنسان بنفس القيمة، أي نفس المسافة أو الفترة الزمنية. وتحل النسبية الخاصة التعارض بين حدسنا عن الحركة وخواص الضوء، وذلك بالطريقة الدقيقة التي وضع بها آينشتاين الخطوط الأساسية للنسبية الخاصة. لكن لذلك ثمناً: فالأشخاص الذين يتحركون بعضهم بالنسبة لبعض لن يتفقوا على المشاهدات الخاصة بكل منهم حول المكان أو الزمان.

لقد مر قرن تقريباً منذ أن أعلن آينشتاين على العالم اكتشافه الدرامي، ومع ذلك فإن معظمنا يرى المكان والزمان كأمر مطلق. لم ترسخ النسبية الخاصة في نفوسنا بعد، فنحن لا نشعر بها، ومضامينها لا تمثل جزءاً أساسياً في حدسنا. والسبب في ذلك بسيط جداً. تعتمد تأثيرات النسبية الخاصة في السرعة التي يتحرك بها الإنسان، وبالنسبة لسرعات السيارات والطائرات وحتى سفن المكان فإن هذه التأثيرات ضئيلة. وهناك بالفعل فروق بين الإدراك الحسي للمكان والزمان عند الأفراد المستقرين على الأرض والمسافرين في سيارات وطائرات، لكن هذه الفروق من الضآلة بحيث لا يمكن ملاحظتها. ومع ذلك، لو سافر أحد في رحلة مستقلا مركبة فضائية مستقبلية سرعتها تمثل جزءاً محسوساً من سرعة الضوء، فإن تأثير النسبية سيبدو واضحاً تماماً. وما زال هذا جزءاً من دنيا الخيال العلمي. وعلى

الرغم من ذلك، كما سنناقش في ما بعد، فإن التجارب الذهنية تسمح بمشاهدات واضحة ودقيقة للخواص النسبية للمكان والزمان التي تنبأت بها نظرية آينشتاين.

ولإدراك المقاييس المعنية هنا، لنتخيل أننا في عام 1970، وقد ظهرت بعض السيارات الكبيرة والسريعة. أنفق سليم لتوه كل مدخراته ليشتري سيارة جديدة من نوع ترانس آم، وقد اصطحب شقيقه جيم إلى المضمار المحلي لاختبار السيارة في سرعات غير مسموح بها من بائع السيارة. وبعد أن أدار المحرك مرق سليم بها على المضمار بسرعة 120 ميلاً في الساعة في ما كان جيم يسجل زمنه وهو يقف جانباً. ولأن سليم كان يرغب في التأكد بشكل مستقل من الزمن الذي يستغرقه، استخدم ساعة إيقاف معه داخل السيارة. وقبل نشر أبحاث آينشتاين لم يكن أحد يتساءل ما إذا كانت ساعتا إيقاف كل من سليم وجيم ستقيس نفس الزمن أم لا. ولكن طبقاً للنسبية الخاصة بينما ستسجل ساعة جيم الزمن 30 ثانية، ستسجل ساعة سليم زمنا مقداره 29.99999999999952 ثانية، أي أقل بمقدار ضئيل جداً. وبديهي أن هذا الفرق من الصغر بحيث لا يمكن أن يقاس إلا بأجهزة تتعدى بمراحل في دقتها ساعات الإيقاف اليدوية، وأنظمة تسجيل الوقت الأوليمبية، بل وحتى تتعدى أكثر الساعات الذرية الهندسية دقة. وليس غريباً أن خبرتنا اليومية لا تكشف حقيقة أن مرور الزمن يعتمد على حالة الحركة.

وسيحدث نفس عدم الاتفاق بالنسبة لقياس الأطوال. فعلى سبيل المثال، وفي تجربة أخرى يستخدم فيها جيم حيلة ذكية لقياس طول سيارة سليم الجديدة: يبدأ بتشغيل ساعة الإيقاف عندما تمر أمامه مقدمة سيارة سليم ثم يوقف تشغيل الساعة عند لحظة مرور مؤخرة السيارة. وحيث أن جيم يعلم أن سرعة سيارة سليم 120 ميلاً في الساعة، فهو بذلك يستطيع حساب طول السيارة، وذلك بضرب السرعة في الزمن المسجل بساعته. ومرة أخرى، وقبل آينشتاين، لم يكن أحد ليتساءل عما إذا كان طول السيارة المقيس بطريقة جيم غير المباشرة سينطبق تماما على طولها الذي قاسه سليم بعناية عندما كانت السيارة واقفة على أرضية المعرض: وعلى العكس، تقول النسبية الخاصة أنه إذا كان سليم وجيم يجريان قياساتهما بدقة، ووجد سليم أن سيارته طولها 16 قدما بالضبط، فإن جيم سيجد أن طولها 15.99999999999974 قدماً - أي بفارق ضئيل جداً. وكما سبق بالنسبة لقياس الزمن، فإن الفرق ضئيل جداً لدرجة أن أجهزة القياس العادية ليست على درجة من الدقة تسمح لها باكتشاف هذا الفرق.

ومع أن هذه الفروق في غاية الضآلة إلا أنها تظهر شرخاً في المفهوم الشائع عن ثبات وعالمية المكان والزمان. وكلما زادت السرعة النسبية للأفراد كما في

حالة سليم وجيم، فإن الشرح يزداد وضوحاً. وللوصول إلى فروق ملحوظة، لا بد أن تصبح السرعات المعنية جزءًا لا بأس به من السرعة المحتملة القصوى - أي سرعة الضوء - التي أثبتت نظرية وقياسات ماكسويل أنها حوالى 186000 ميل في الثانية أو 670 مليون ميل في الساعة. وهذه السرعة من الكبر بحيث تلف كوكب الأرض أكثر من سبع مرات في الثانية الواحدة. وإذا كان سليم، على سبيل المثال، يقود سيارته بسرعة 580 مليون ميل في الساعة (أي 87٪ من سرعة الضوء) بدلاً من 120 ميلاً فقط، فإن رياضيات النسبية الخاصة تتنبأ بأن طول السيارة الذي سيقيسه جيم سيكون 8 أقدام فقط، وهو فرق كبير عما يقيسه سليم (وعن المواصفات المذكورة في كتيب السيارة). وبالمثل، فإن الزمن الذي يستغرقه سليم ليقطع المضمار والمقاس بواسطة جيم سيكون تقريباً ضعف الزمن الذي سيسجله سليم لنفس المضمار.

وحيث أن مثل هذه السرعات الهائلة تقع بعيداً خارج أي شيء يمكن التوصل إليه حالياً، فإن ظاهرة "تمدد الزمن Time Dilation" و"تقلص لورنتز Lorentz Contraction" - كما يطلق تقنياً على هاتين الظاهرتين - ضئيلة جداً في حياتنا اليومية. فإذا حدث وكنا في عالم تنتقل فيه الأشياء بسرعات تقارب سرعة الضوء، فإن خواص المكان والزمان بهذا الشكل ستصبح حدسية تماماً - لأننا سنستشعرها بصورة دائمة بحيث لا يتطلب الأمر مناقشات أكثر من الحركة الظاهرية للأشجار على جانبي الطريق التي ذكرناها في مستهل هذا الفصل. وبما أننا لا نعيش في مثل هذا العالم، فإن هذه الخواص غير مألوفة لنا. وكما سنرى فإن إدراك وتقبل هذه الخواص يتطلب أن نعرض نظرتنا للعالم إلى تغيرات شاملة.

ثانياً: مبدأ النسبية

هناك بنيتان راسختان تشكلان أساس النسبية الخاصة. وكما ذكرنا سابقاً، فإن إحداهما هي خواص الضوء، وسنناقشها بشكل أكثر تفصيلاً لاحقاً. أما البنية الأخرى فهي أكثر تجريداً. وهي لا تتعلق بقانون فيزيائي محدد، وإنما تتعلق بكل قوانين الفيزياء وتعرف باسم "مبدأ النسبية Principle of Relativity" . ويقوم مبدأ النسبية على حقيقة بسيطة: في أي وقت نناقش فيه السرعة (سرعة الجسم واتجاه حركته) لا بد أن نحدد بالضبط من أو ما الذي يقوم بالقياس. ومن السهل التوصل إلى إدراك معنى وأهمية هذه المقولة إذا فكرنا ملياً في الوضع الآتي: لنتخيل جورج، وهو شخص يرتدي بدلة فضاء مزودة بضوء أحمر يضيء دورياً، وهو يسبح في فضاء مظلم خال تماماً وبعيد جداً عن أي كوكب أو نجوم أو مجرات.

ومن منطلق جورج، فإنه ساكن تماماً في أعماق الظلام المنتظم من حوله في الفضاء. وعلى مسافة بعيدة تلتقط عين جورج ضوءًا أخضر يتوهج وينطفئ دورياً ويبدو وكأنه يقترب أكثر وأكثر منه. وفي النهاية يقترب الضوء من جورج لدرجة أنه يميز فيه حلة فضاء أخرى لجوالة في الفضاء، تسبح ببطء واسمها غريس. تحيي غريس جورج، ويرد عليها التحية وهى تتباعد في الفضاء. ويمكن إعادة سرد هذه القصة من وجهة نظر غريسي بنفس الكلام ونفس درجة اليقين. وتبدأ القصة بغريس ساكنة في الفضاء الخارجي اللانهائي، وعن بعد تلمح غريس ضوءًا أحمر يتوهج وينطفئ ويبدو وكأنه يقترب أكثر وأكثر منها. وفي النهاية يصبح قريباً منها للدرجة التي تميز فيها غريس أن هذا الضوء لبدلة فضاء شخص آخر - جورج الذي يسبح ببطء، ويحييها جورج وترد عليه غريس التحية ثم يتباعد في الفضاء.

وتصف القصتان نفس الموقف من وجهتي نظر متباينتين لكنهما صادقتان. فكل واحد منهما يشعر أنه ساكن ويرى أن الآخر هو الذي يتحرك. ويمكن تفهم وجهة نظر كل منهما ومبرراتها. وحيث أن هناك تماثلاً بين رائدي الفضاء، فإننا لا يمكن أن نقول - وعلى أسس سليمة - أن أحدهما على "صواب" والآخر على "خطأ". وكل وجهة نظر صحيحة بنفس الدرجة.

ويصور هذا المثال معنى مبدأ النسبية: مفهوم الحركة نسبي. ولا يمكن أن نتكلم على حركة جسم إلا بالنسبة لجسم آخر أو مقارنة به. وبذا لا معنى لعبارة "ينتقل جورج بسرعة 10 أميال في الساعة"، حيث أننا لم نحدد أي جسم آخر للمقارنة. لكن هناك معنى للعبارة "ينتقل جورج بسرعة 10 أميال في الساعة مارًا بغريس" لأننا قد حددنا بذلك غريس كنقطة مرجعية للقياس. وكما يتضح من هذا المثال، فإن العبارة الأخيرة مكافئة تماما لعبارة "تنتقل غريس بسرعة 10 أميال في الساعة مارة بجورج (في الاتجاه العكسي)". وبمعنى آخر، لا يوجد مفهوم "مطلق" للحركة. فالحركة نسبية.

وجوهر هذه القصة هو أنه لا جورج ولا غريس قد دفعتهما أو شدتهما أو أثرت فيهما أية قوى أو وقعا تحت تأثير أي عامل آخر قد يؤثر في حالة الحركة الرتيبة الحرة ذات السرعة الثابتة لهما. ولذا، وبعبارة أكثر دقة، فإن السرعة الحرة التي لا تؤثر فيهما قوى خارجية (Force-Free) ليس لها معنى إلا إذا قورنت بأجسام أخرى. وهذا توضيح هام لأنه إذا تدخلت القوى فستتسبب في تغيير سرعة الراصدين - أي تغير من سرعتهم و/أو اتجاه حركتهم - ويمكن الإحساس بهذا التغيير. فمثلاً، إذا كان جورج يضع على ظهره صاروخاً يدفعه فإنه قطعاً سيشعر أنه يتحرك. وهو شعور داخلي. فإذا كان الصاروخ يعمل فإن جورج سيدرك أنه

يتحرك حتى لو كانت عيناه مقفلتين ولذلك لا يستطيع إجراء مقارنة بأجسام أخرى. وبدون مثل هذه المقارنات، فإنه لا يمكن أن يدعي أنه ساكن بينما "يتحرك العالم من حوله". والحركة ذات السرعة الثابتة شيء نسبي، والأمر ليس كذلك بالنسبة للحركة غير ثابتة السرعة، أو بنفس المعنى الحركة المتسارعة. (وسيفيد اختبار هذه المقولة في الفصل القادم عندما نتناول الحركة المتسارعة ونناقش نظرية النسبية العامة لآينشتاين).

عندما نضع هذه القصص في ظلمة الفراغ الخاوي فإن ذلك يساعد في الفهم، وذلك بإزالة الأشياء المألوفة مثل الشوارع والمباني والتي ننسب لها بحكم العادة - من دون وجه حق - صفة خاصة هي أنها "ثابتة". ومع ذلك ينطبق نفس المبدأ على الأوضاع الأرضية، الأمر الذي في الحقيقة نمارسه بشكل شائع[1]. فمثلا، تخيل أنك بعد أن استغرقت في النوم في قطار، استيقظت بالضبط لحظة مرور قطارك بجوار قطار آخر على طريق مواز. وحيث أن القطار الآخر سيحجب عنك تماماً المنظر من النافذة، وبذلك سيمنع رؤيتك لأي جسم آخر، فإنك مؤقتاً لن تدرك ما إذا كان قطارك هو الذي يتحرك أم القطار الآخر أو كلاهما. وطبعا لو كان قطارك يهتز أو يترجرج أو كان يغير من اتجاهه بالدوران حول أحد المنحنيات فستشعر أنك تتحرك. لكن إذا كان القطار يتحرك بنعومة تامة - وتظل سرعته ثابتة - فإنك ستشعر بالحركة النسبية بين القطارين من دون أن تتمكن من معرفة أيهما هو الذي يتحرك.

ولنذهب خطوة أبعد من ذلك. تخيل نفسك في مثل هذا القطار، وأنك أغلقت ستائر النوافذ تماماً. فإذا افترضنا أن سرعة القطار ثابتة تماماً، وأنك لا تملك المقدرة على رؤية أي شيء خارج عربة القطار، فإنه لا توجد وسيلة تتعرف بها على حالة الحركة. وسيبدو منظر العربة حولك هو نفسه من دون أي تغير تماماً سواء كان القطار ساكناً في محله أو يتحرك بسرعة عالية. وقد صاغ آينشتاين هذه الفكرة، التي ترجع أصولها في الواقع إلى أفكار غاليليو، وهو يزعم أنه من المستحيل لك أو لأي شخص آخر مسافر بالقطار أن يقوم بتجربة داخل عربة قطار مغلقة بحيث يحدد ما إذا كان القطار يتحرك أم لا. ويصور ذلك مرة أخرى مبدأ النسبية: حيث أن كل التحركات الحرة التي لا تخضع لتأثير قوى خارجية ليس لها معنى إلا إذا قورنت بأشياء أو أفراد آخرين يتحركون كذلك حركة حرة من دون

(1) وجود أجسام ذات كتلة مثل الأرض يزيد تعقد الموضوعات بإقحام قوى الجاذبية. وحيث أننا نركز الآن على الحركة في الاتجاه الأفقي - وليس الرأسي - فسنهمل وجود الأرض. وفي الفصل القادم سنقوم بمناقشة مستفيضة للجاذبية.

الخضوع لتأثير قوى خارجية. ولا توجد وسيلة تمكنك من تحديد أي شيء عن حالة الحركة التي أنت عليها من دون القيام بمقارنة مباشرة أو بصورة غير مباشرة مع جسم آخر "خارجي"، وببساطة، لا يوجد مفهوم عن الحركة ذات السرعة الثابتة "المطلقة"؛ والمقارنات فقط هي التي لها معنى فيزيائي.

وقد أيقن آينشتاين في الواقع أن مبدأ النسبية يقول ما هو أكثر من ذلك: كل قوانين الفيزياء - مهما كانت - لابد أن تكون واحدة مطلقاً بالنسبة لكل الراصدين إذا كانوا في حركة ثابتة السرعة. فإذا كان جورج وغريس لا يسبحان منفردين في الفضاء، لكنهما كانا يقومان بنفس مجموعة التجارب في محطتيهما الفضائيتين اللتين تسبحان في الفضاء، فإن النتائج التي سيحصلان عليها ستكون متطابقة. ومرة أخرى، فإن كلا منهما سيعتقد عن قناعة أن محطته ساكنة، على الرغم من أن المحطتين في حركة نسبية. فإذا كانت كل أجهزتهما واحدة، فلا يوجد ما يميز وضع الأجهزة بعضها من بعض، فإنهما متماثلان تماماً. وبناءً على ذلك فإن قوانين الفيزياء التي سيستنتجها كل منهما من هذه التجارب ستكون واحدة. ولن يشعرا هما أو تجاربهما - التي تعتمد عليهما عموماً - بأنهما يتحركان بسرعة ثابتة. إنه هذا المفهوم البسيط الذي يجعل مثل هذين الراصدين متماثلين تماماً، إنه هذا المفهوم الذي يقع في صلب مبدأ النسبية. وسنستخدم هذا المبدأ حالاً بشكل مكثف.

ثالثاً: سرعة الضوء

لابد أن يتناول المكون الأساسي الثاني في النسبية الخاصة الضوء وخواص حركته. وعلى عكس ما نزعمه بأنه لا معنى لمقولة "ينتقل جورج بسرعة 10 أميال في الساعة" من دون تحديد نقطة مرجعية للمقارنة، فإن جهود مجموعات من الفيزيائيين التجريبيين المتتابعة على مدى ما يقرب من قرن من الزمان قد بينت أن كل الراصدين سيتفقون على أن الضوء ينتقل بسرعة 670 مليون ميل في الساعة "من دون تحديد نقطة مرجعية للمقارنة".

وقد أحدثت هذه الحقيقة ثورة في نظرتنا للعالم. ولنبدأ أولاً في إدراك ما تعنيه هذه الحقيقة، وذلك بمقارنتها بمقولات مماثلة في حالة أجسام أخرى أكثر شيوعاً. تخيل أنك كنت في الخارج في يوم رائع مشمس مع صديقة لك تمارسان إحدى اللعبات. وكنتما تتقاذفان بينكما الكرة بسرعة 20 قدماً في الثانية مثلاً. وفجأة ضربت صاعقة كهربية فوق رأسيكما، الأمر الذي دفعكما للركض بحثاً عن حماية. وبعد مرور العاصفة عدتما لاستئناف اللعبة، لكنك ستلاحظ حدوث بعض التغيير.

فقد أصبح شعر صديقتك نافراً في جميع الاتجاهات، وعيناها أصبحتا متعبتين مضطربتين. وإذا نظرت إلى يديها فسيزعجك أن ترى أنها لا تنوي أن تلعب بكرة البيسبول مرة ثانية، ولكنها بدلاً من ذلك ستقذفك بقنبلة يدوية. ومن المفهوم أن حماسك للعب سيتضاءل بشدة، وستجري هارباً. لكن لأنك تجري، فإن السرعة التي تلاحقك بها هذه القنبلة ستكون أقل من 20 قدماً في الثانية. ومن خبرتنا العامة، فإنه في الحقيقة إذا كنت تجري بسرعة تقترب من 12 قدماً في الثانية، فإن سرعة اقتراب القنبلة اليدوية منك ستكون (20–12=) 8 أقدام في الثانية. وفي مثال آخر، إذا كنت على الجبال وبدأت كتلة من الجليد في الانهيار تجاهك، فإن فكرك سيتجه إلى الدوران والجري، لأن ذلك سيتسبب في خفض سرعة اقتراب كتلة الجليد منك – وهو أمر طيب عموماً. ومرة أخرى، فإن سرعة كتلة الجليد المنهارة بالنسبة لراصد ساكن لا يتحرك ستكون أكبر من سرعتها بالنسبة للشخص الذي يجري محاولاً الابتعاد عنها.

والآن لنقارن هذه المشاهدات الأساسية حول لعبة البيسبول والقنابل اليدوية والانهيارات الجليدية مع مشاهدتنا حول الضوء. ولنجعل المقارنة أكثر إحكاماً، لنتخيل أن شعاع الضوء يتكون من "أكياس" أو "حزم" دقيقة تسمى فوتونات (صفة من صفات الضوء سنناقشها بتفصيل أكبر في الفصل الرابع). وعندما نضيء كشافاً أو نرسل شعاعاً من الليزر، فإننا في الواقع نطلق تياراً من الفوتونات في اتجاه ضوء الكشاف أو شعاع الليزر. وكما فعلنا مع القنابل اليدوية والانهيارات الجليدية، فلنتخيل كيف تبدو حركة الفوتون لشخص ما أثناء حركته. ولتتخيل أن صديقتك المضطربة قد استبدلت القنبلة اليدوية بشعاع قوي من الليزر. فإذا أطلقت هذا الشعاع تجاهك، وكان لديك أجهزة لقياس سرعة الفوتونات المقتربة منك مع هذا الشعاع، فستجد سرعتها 670 مليون ميل في الساعة. لكن ما الذي سيحدث إذا كنت ستجري هارباً كما فعلت عندما لعبت معك بالقنبلة اليدوية؟ وما هي السرعة التي ستسجلها للفوتونات المتجهة إليك؟ وحتى نفهم الأمر بصورة أفضل، تخيل أنك تركب سفينة الفضاء "إنتربرايز" وتفلت من صديقتك بسرعة 100 مليون ميل في الساعة مثلاً. وباتباع المنطق القائم على رؤية نيوتن التقليدية، وحيث أنك تبتعد، فإنه من المتوقع أن تسجل سرعة أبطأ للفوتونات المتجهة نحوك. وعلى وجه التحديد فإنك ستتوقع أن تجد سرعة الفوتونات المقتربة منك (670 مليون ميل في الساعة – 100 مليون ميل في الساعة = 570 مليون ميل في الساعة).

وقد تمكنت أعداد هائلة من الأدلة التي حصل عليها العلماء من تجاربهم والتي يرجع تاريخها إلى العام 1880، كذلك التحليل الدقيق لتفسيرات نظرية

ماكسويل الكهرومغناطيسية عن الضوء، من إقناع المجتمع العلمي ببطء بأن هذا في الواقع ما لا يحدث. وحتى لو كنت تتقهقر فإنك ستسجل سرعة للفوتونات المقتربة منك مساوية لـ 670 مليون ميل في الساعة وليس أقل من ذلك بأية قيمة مهما صغرت. ومع أن ذلك قد يبدو غريباً جداً لأول وهلة ومختلفاً عما حدث للشخص الذي يجري مبتعداً عن كرة البيسبول أو القنبلة اليدوية أو الكتلة الجليدية المنهارة، فإن سرعة الفوتونات المقتربة دائما 670 مليون ميل في الساعة. ويحدث نفس الشيء إذا كنت تجري في اتجاه الفوتونات القادمة أو عكس اتجاهها ـ فسرعة اقترابها أو ابتعادها ثابتة تماماً لا تتغير؛ وستظل تنتقل بسرعة 670 مليون ميل في الساعة. وبغض النظر عن الحركة النسبية لمصدر الفوتونات والراصد فإن سرعة الضوء دائما واحدة[2].

ولا تسمح الإمكانات التقنية المحدودة بإجراء مثل هذه التجارب التي وضعناها عن الضوء، غير أن تجارب المقارنة ممكنة. فمثلاً، اقترح عالم الفيزياء الهولندي ويليم دي سيتير سنة 1913 أنه يمكن استخدام زوج من النجوم يتحرك بسرعة (نجمان يدوران أحدهما حول الآخر) لقياس تأثير مصدر متحرك على سرعة الضوء. وقد أكدت التجارب المختلفة من هذا النوع خلال العقود الثمانية الماضية أن سرعة الضوء القادم من نجم متحرك هي نفسها سرعته من نجم ساكن - 670 مليون ميل في الساعة - في حدود دقة مذهلة لأجهزة قياس في غاية الدقة. والأكثر من ذلك، فإن عدداً كبيراً من تجارب تفصيلية أخرى أجريت خلال القرن الماضي - تجارب تقيس سرعة الضوء مباشرة في ظروف مختلفة، كما أنها تختبر العديد من النتائج التي تظهر عن هذه الخاصية للضوء - كما شرحنا ذلك حالاً - وقد أكد كل ذلك ثبات سرعة الضوء.

وإذا لم تستطع تقبل هذه الخاصية للضوء، فلست وحدك. وعلى منعطف القرن، حاول علماء الفيزياء جهدهم لتفنيد ذلك، لكنهم لم يتمكنوا. وعلى العكس، فإن آينشتاين احتضن فكرة ثبات سرعة الضوء، لأنه وجد في ذلك الإجابة عن المعضلة التي كانت تقلقه منذ أن كان مراهقاً. فمهما كانت السرعة التي تلاحق بها شعاع الضوء فإنه سيظل يتحرك مبتعداً عنك بسرعة الضوء. ولن تستطيع أن تغير من السرعة الظاهرية لانتقال الضوء قيد أنملة عن 670 مليون ميل

(2) وسرعة الضوء في الفضاء الخاوي هي، بدقة أكثر، 670 مليون ميل في الساعة. وتنخفض سرعة الضوء عندما ينتقل في مادة مثل الهواء أو الزجاج تقريباً كما في حالة سقوط حجر من أعلى جرف عندما يدخل مسطحاً مائياً. وهذا هو التباطؤ في سرعة الضوء بالنسبة لسرعته في الفراغ، وهو لا يؤخذ في اعتبارنا أثناء مناقشاتنا للنسبية، لذا فقد جرى إهماله خلال هذا الكتاب.

في الساعة، بل وأكثر من ذلك، فإنك لن تستطيع إبطاءه ليبدو ساكناً بالنسبة إليك. انتهت القضية. لكن الانتصار على التناقض لم يكن أمراً هيناً. فقد أيقن آينشتاين أن ثبات سرعة الضوء عني سقوط فيزياء نيوتن.

رابعاً: الحقيقة ونتائجها

السرعة مقياس للمسافة التي يقطعها جسم في زمن معين. فإذا كنا في سيارة تقطع 65 ميلا في الساعة، فإن ذلك يعني طبعاً أننا ننتقل 65 ميلاً إذا حافظنا على هذه السرعة لمدة ساعة. والسرعة بهذه الصياغة مفهوم دنيوي، ويمكن أن تتعجب لم كل هذه الضجة التي أثرناها حول سرعة كرة البيسبول وكرات الجليد والفوتونات. ومع ذلك، دعنا نذكِّر بأن المسافة مفهوم يتعلق بالفضاء. وبالتحديد هي مقياس لمقدار ما هو موجود بين نقطتين. كما أن مفهوم "الأمد" أو "الدوام" (Duration) يتعلق بالزمن - كم من الزمن يمضي بين حدثين. وبذلك فإن السرعة ترتبط بمفهومنا عن المكان والزمان ارتباطاً وثيقاً. وبمثل تلك الصياغة، فإن الحقائق التجريبية التي تتحدى مفهومنا العام عن السرعة، مثل ثبات سرعة الضوء، لها من الإمكانات أن تتحدى مفاهيمنا العامة عن المكان والزمان نفسيهما. ولهذا السبب فإن الحقيقة الغريبة عن سرعة الضوء تستحق تدقيقاً أكثر تفصيلا - التدقيق الذي جاء به آينشتاين وأدى إلى نتائج مذهلة.

1 - التأثير في الزمن: الجزء الأول

يمكننا بأقل مجهود ممكن، وباستغلال ثبات سرعة الضوء، أن نبين أن المفهوم اليومي المألوف للزمن خطأ بلا جدال. تخيل أن زعيمي أمتين متحاربتين يجلسان على طرفي مائدة المفاوضات الطويلة، وقد توصلا لتوهما إلى اتفاق لوقف إطلاق النار، لكن لا يرغب أي منهما في أن يوقع قبل الآخر. ويأتي سكرتير عام الأمم المتحدة بفكرة قرار ذكي. سيوضع مصباح مطفأ على المنضدة في منتصف المسافة بين الرئيسين. وعند إضاءة المصباح فإن الضوء المشع منه سيصل إلى كل منهما في نفس الوقت حيث أن المسافة بين كل واحد منهما والمصباح متساوية. وقد وافق كل رئيس على التوقيع على نسخة من الاتفاق عند رؤيته للضوء. تم تنفيذ الخطة وتوقيع الاتفاق برضاء الطرفين.

حاول السكرتير العام أن يستخدم نفس الطريقة، بعد النجاح الذي أبهجه، في حالة أمتين أخريين متحاربتين، توصلتا إلى اتفاق سلام. لكن الفرق الوحيد هنا هو أن الرئيسين المعنيين في هذه المفاوضات يجلسان على طرفي منضدة داخل

قطار يسير بسرعة ثابتة. كان رئيس الدولة التي يسير إليها القطار يجلس في مواجهة اتجاه السير، بينما يجلس رئيس الدولة التي تقع خلف القطار مواجهاً الاتجاه العكسي. ولأن السكرتير العام على علم بحقيقة أن قوانين الفيزياء لها نفس الشكل من دون النظر إلى حركة الراصد، طالما أن حركته ثابتة، فإنه لم يعر هذا الفرق أي اهتمام، ويحضر المصباح الذي سيعطى إشارة البدء في احتفالية التوقيع كما حدث سابقاً. ويوقع الرئيسان الاتفاق ويحتفلان مع حاشيتهما من المستشارين بانتهاء العداوة.

وفي نفس اللحظة وصلت الأنباء بأن القتال نشب من جديد بين الناس من الجانبين الذين كانوا يشاهدون مراسم التوقيع من على رصيف المحطة خارج القطار المتحرك. وقد انزعج كل من كان داخل قطار المفاوضات لسماعهم أن سبب تجدد العداوة هو ادعاء الناس من الدولة التي تقع أمام القطار بأنهم قد خدعوا حيث قام رئيسهم بالتوقيع على الاتفاق قبل رئيس الدولة التي تقع خلف القطار. وحيث أن كل من كان في القطار - من الجانبين - يوافق تماماً على أن الاتفاق قد تم توقيعه في نفس اللحظة، فكيف يمكن للمشاهدين للمراسم من الخارج أن يظنوا غير ذلك؟

ولنتدارس بتفاصيل أكثر رؤية أحد المشاهدين من على رصيف المحطة. في البداية كان المصباح مطفأ، ثم في لحظة معينة أضاء مرسلاً بأشعة الضوء في اتجاه كل من الرئيسين. ومن منظور شخص على رصيف المحطة، فإن رئيس الدولة الواقعة في اتجاه القطار يسافر عكس اتجاه الضوء، بينما يتقهقر رئيس الدولة الواقعة خلف القطار. ويعني ذلك، بالنسبة للمشاهد من على رصيف المحطة، أن شعاع الضوء سيقطع مسافة أقصر بالنسبة لرئيس الدولة الواقعة أمام القطار والذي يتحرك تجاه الضوء المقترب، مما بالنسبة لرئيس الدولة الواقعة خلف القطار، والذي يتحرك مبتعداً عن الضوء. وليست هذه مقولة عن "سرعة" الضوء عندما ينتقل في اتجاه الرئيسين - وقد أشرنا من قبل أنه مهما كانت حالة حركة المصدر أو المشاهد فإن سرعة الضوء تظل ثابتة دائماً. ولكننا نضيف هنا فقط كم سيقطع شعاع الضوء الذي انطلق في لحظة البداية ليصل إلى كل رئيس منهما، وذلك من وجهة نظر المشاهدين من على رصيف المحطة. وحيث أن هذه المسافة أقصر بالنسبة لرئيس الدولة التي تقع أمام القطار مما بالنسبة لرئيس الدولة التي تقع خلف القطار، وحيث أن سرعة الضوء في اتجاه كل منهما ثابتة، فإن الضوء سيصل لرئيس الدولة الواقعة أمام القطار أولاً. ولهذا السبب ادعى مواطنو هذه الدولة أنهم قد خدعوا.

وعندما أذاعت محطة CNN شهادة الحاضرين، فإن كلا من السكرتير العام والرئيسين وكل مستشاريهم لم يصدقوا ما سمعوه. فكلهم متفق أن المصباح كان موضوعاً بعناية في منتصف المائدة تماماً بين الرئيسين، ولهذا، وبدون أي لغط أو ضجة، فإن الضوء المشع قد قطع نفس المسافة ليصل إلى كل منهما. وحيث أن سرعة الضوء المشع في اتجاه اليمين أو اليسار متساوية فإنهم يعتقدون وبالفعل شاهدوا أن الضوء قد وصل إلى كل من الرئيسين في نفس الوقت.

من الذي على صواب، الذين في داخل القطار أم الذين خارجه؟ فمشاهدات كل مجموعة والتفسيرات المؤيدة لها معصومة من الخطأ. والجواب هنا أن "كلا الطرفين" على صواب. مثل جورج وغريسي السابحين في الفضاء، فكل منهما على صواب من وجهة نظره. والأمر المؤكد هنا أن الحقيقة من وجهة نظر كل منهما متناقضة. والقضية السياسية محل النزاع هنا هي: هل وقع الرئيسان الاتفاقية في نفس اللحظة؟ وتؤدي بنا الملاحظات والأسباب المذكورة أعلاه بشكل لا يقاوم إلى النتيجة الآتية: بالنسبة لمن هم في القطار فإن الرئيسين وقعا في نفس اللحظة، بينما من وجهة نظر من هم على رصيف المحطة، لم يفعلا ذلك. وبمعنى آخر فإن الأشياء المتزامنة من وجهة نظر بعض المشاهدين ليست متزامنة من وجهة نظر آخرين، إذا كانت المجموعتان في حركة نسبية.

وهذه نتيجة فذة، وواحدة من أهم وأعمق ما تم اكتشافه حتى الآن من طبيعة الواقع. ومع ذلك، فإنك إذا لم تتذكر من كل ما قرأته في هذا الفصل بعد أن تكون قد فرغت من الكتاب، إلا المحاولة الفاشلة للاتفاق، فإنك بذلك تكون قد احتفظت بروح اكتشاف آينشتاين. وبدون رياضيات متقدمة أو سلسلة من الأمور المنطقية المعقدة، فإن هذه الخاصية غير المتوقعة تماماً تنتج مباشرة من ثبات سرعة الضوء كما يصورها هذا السيناريو، وتجدر ملاحظة أنه إذا كانت سرعة الضوء ليست ثابتة ولكن تسلك تبعا للحدس القائم على الحركة البطيئة لكرة البيسبول أو الكرة الجليدية، فإن المشاهدين من على رصيف المحطة سيتفقون مع من هم في القطار. لكن سيظل المشاهد من على رصيف المحطة معتقداً أن الفوتونات تنتقل مسافة أبعد للوصول إلى رئيس الدولة الواقعة خلف القطار مما للوصول إلى رئيس الدولة الواقعة أمام القطار. غير أن الحدس العادي يعني أن الضوء الذي يقترب من رئيس الدولة الواقعة خلف القطار سيتحرك أسرع حيث أنه أخذ "دفعة" من القطار المتحرك إلى الأمام. وبالمثل فإن هؤلاء المشاهدين سيرون الضوء الذي يقترب من رئيس الدولة الواقعة أمام القطار يتحرك أبطأ لأنه "يُشَدُّ" إلى الخلف بواسطة حركة القطار. وعندما يأخذ المشاهدون هذه الظواهر الخاطئة

في اعتبارهم فإنهم سيرون أن أشعة الضوء ستصل لكلا الرئيسين في نفس الوقت. ومع ذلك فإن الضوء، في عالم الحقيقة، لا يسرع ولا يبطئ من حركته، ولا يمكن دفعه إلى سرعة أعلى أو شده إلى سرعة أقل. وبذلك فإن المشاهدين على رصيف المحطة سيدعون بصدق أن الضوء قد وصل إلى رئيس الدولة الواقعة أمام القطار أولاً.

ويتطلب ثبات سرعة الضوء أن نتخلى عن المفهوم القديم الذي يقول بأن التزامن (Simultaneity) مفهوم كوني، يتفق عليه كل واحد من دون النظر لحالة الحركة التي هو عليها. والساعة الكونية التي كنا نعتبرها تدق بلا كلل نفس الثواني هنا على الأرض وعلى المريخ وعلى المشتري وفي مجرة أندروميدا وفي كل ركن من أركان الكون، هذه الساعة ليست موجودة. وعلى العكس، فإن المشاهدين الموجودين في حركة نسبية لن يتفقوا على أن الأحداث تقع في نفس الزمن. ومرة أخرى، فإن السبب في أن هذه النتيجة - المميزة بصدق للعالم الذين نعيش فيه - ليست مألوفة أبداً، هو أن التأثيرات التي تحدثها متناهية الضآلة عندما تكون السرعات المعنية هي السرعات التي نتعامل معها بشكل عام في حياتنا اليومية. ولو كان طول مائدة المفاوضات 100 قدم، وسرعة القطار 10 ميل في الساعة، فإن المشاهدين على رصيف المحطة "سيرون" أن الضوء قد وصل إلى رئيس الدولة الواقعة أمام القطار قبل الرئيس الآخر بمقدار جزء من مليون من مليار من الثانية ($\frac{1}{1000000000000000}$ من الثانية). ومع أن ذلك يمثل اختلافاً إلا أنه من الضآلة بحيث لا يمكن اكتشافه مباشرة بالحواس البشرية. فإذا كان القطار يتحرك بسرعة أكبر كثيراً، ولتكن 600 مليون ميل في الساعة، فإنه من وجهة نظر شخص على رصيف المحطة فإن الضوء سيستغرق زمنا أطول 20 مرة ليصل إلى رئيس الدولة الواقعة خلف القطار مقارنة بالزمن الذي يستغرقه هذا الضوء ليصل إلى رئيس الدولة الأخرى. وفي السرعات العالية فإن التأثيرات المذهلة للنسبية الخاصة تصبح أكثر وضوحاً.

2- التأثير في الزمن: الجزء الثاني

من الصعب إيجاد تعريف مجرد "للزمن" - وقد آلت كل المحاولات حتى الآن لتعريف الزمن إلى الاستدلال بكلمة "الزمن" نفسها، أو أدت إلى الدخول في متاهات لغوية لتجنب هذا التعريف. وبدلاً من سلوك هذا الطريق يمكن أن نلجأ إلى وجهة نظر براغماتية لنعرِّف الزمن بأنه الشيء الذي تقيسه الساعة. وسيحيل هذا الأمر مشكلة التعريف إلى التعريف بكلمة "الساعة"؛ وهنا يمكن أن

نفكر بشكل غير دقيق في أن الساعة هي الجهاز الذي تحدث به حركة دورانية تامة الانتظام، وتقيس الزمن بعد عدد الدورات التي تحدثها ساعتنا. وتخضع الساعات المألوفة مثل ساعات اليد لمثل هذا التعريف: فللأخيرة عقارب تتحرك في دورات منتظمة، وما نفعله في الواقع هو أننا نحسب الزمن المنصرم بعدد الدورات (أو كسورها) التي تحدثها العقارب بين أحداث مختارة.

ومن الطبيعي أن يتضمن معنى "دورات حركة تامة الانتظام" مفهوماً عن الزمن، حيث أن كلمة "منتظمة" تشير إلى فترات زمنية متساوية لكل دورة. ومن منطلق عملي، فإننا نتعامل مع هذا الأمر عبر بناء ساعات من مكونات فيزيائية بسيطة، نتوقع لها - على أساس متين - أن تقوم بحركات حلقية متكررة لا تتغير بأي شكل من الأشكال من حلقة إلى أخرى. وما ساعات أجدادنا ذات البندول الذي يتأرجح يميناً ويساراً، والساعات الذرية التي تقوم على مبدأ تكرار العمليات الذرية إلا أمثلة بسيطة لذلك.

وهدفنا هو فهم كيف تؤثر الحركة في مرور الزمن. وحيث أننا قد عرّفنا الزمن عملياً بمعلومية الساعات، فإننا يمكن أن نحول سؤالنا إلى كيف تؤثر الحركة في دقات الساعة؟ ومن الأهمية أن نؤكد في البداية على أن نقاشنا لا يهتم بكيفية سلوك العناصر الميكانيكية لساعة معينة تجاه الاهتزاز والاصطدام اللذين ينتجان من الحركة المضطربة، لكننا سنهتم في الواقع بأكثر أنواع الحركات بساطة وأكثرها هدوءًا - الحركة بسرعة ثابتة بشكل مطلق - ولذا لن يكون هناك أي اهتزاز أو اصطدام بتاتاً. وبالأحرى، سنهتم بالسؤال الكوني عن كيفية تأثير الحركة في مرور الزمن، وكيف أنها بذلك تؤثر في دقات أي وكل الساعات بصرف النظر عن تصميم أو بناء معين.

وسنعرض هنا لهذا الغرض أكثر الساعات بساطة من حيث المفهوم (غير أنها أكثرها بعداً عن كونها عملية). وتعرف هذه الساعة "بالساعة الضوئية"، وتتكون من مرآتين صغيرتين محمولتين على سنادة إحداهما في مواجهة الآخرى، وبينهما فوتون وحيد يتأرجح جيئةً وذهاباً[3]. فإذا كانت المرآتان على بعد ست بوصات فسيستغرق الفوتون حوالي جزء من مليار من الثانية ليكمل دورة كاملة (من الثانية). ويمكن أن نتخيل أن دقات الساعة الضوئية تحدث كل مرة يكمل فيها الفوتون دورته - وبذا فإن مليار دقة تعني مرور ثانية واحدة.

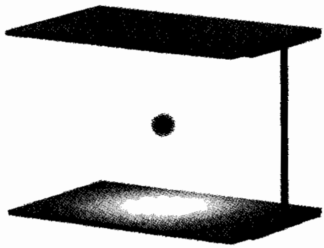
ويمكن استخدام الساعة الضوئية كساعة إيقاف لقياس الزمن المنصرم بين

---

(3) انظر الشكل رقم (2-1).

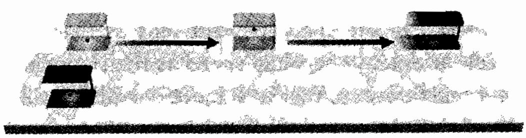
حادثين: وببساطة نقوم بعَدّ الدقات التي حدثت خلال الفترة المعنية ونضربها في زمن كل دقة. فمثلاً، إذا كنا نسجل زمن سباق للخيل ونعدّ دورات الفوتون بين بداية السباق ونهايته، وكانت 55 ملياراً، فيمكن القول إن السباق قد استغرق 55 ثانية.

الشكل رقم (2-1)



تتكون الساعة الضوئية من مرآتين متوازيتين يتراقص بينهما فوتون. و"تدق" الساعة كلما أكمل الفوتون دورة كاملة.

الشكل رقم (2-2)



ساعة ضوئية ساكنة في مقدمة الشكل بينما الساعة الضوئية الأخرى تنزلق بسرعة ثابتة.

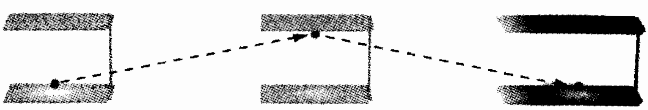
والسبب وراء استخدام الساعة الضوئية في نقاشنا هو أن بساطتها الميكانيكية تنحي جانباً التفاصيل غير الجوهرية. وبذا فإنها تزودنا بما يكشف بأوضح ما يمكن كيفية تأثير الحركة في مرور الزمن. وحتى ندرك ذلك، لنتخيل أننا نراقب في تراخ مرور الزمن وذلك بالنظر إلى ساعة ضوئية تدق فوق منضدة مرتبة. وفجأة تبدأ ساعة ضوئية أخرى في الانزلاق على المنضدة بسرعة ثابتة[4]. والسؤال المطروح هنا هو ما إذا كانت الساعة الضوئية المتحركة ستدق بنفس المعدل مثل الساعة الضوئية الساكنة؟

وللإجابة عن هذا السؤال، لنأخذ في اعتبارنا المسار الذي يجب أن يتخذه الفوتون في الساعة المنزلقة - وذلك من منظورنا - ليحدث دقة واحدة. يبدأ

(4) انظر الشكل رقم (2-2).

الفوتون مساره عند قاعدة الساعة الضوئية المنزلقة كما في الشكل رقم (2-2)، متجها إلى المرآة العليا. وحيث أن الساعة تتحرك من منظورنا، فإن الفوتون لابد أن ينتقل بزاوية كما هو مبين في الشكل رقم (2-3). فإذا لم ينتقل الفوتون عبر هذا المسار فإنه سيخطئ المرآة العليا ويضيع في الفراغ. وحيث أنه من حق الساعة المنزلقة - الحق كل الحق - أن تدعي أنها ساكنة بينما كل شيء حولها يتحرك، فإننا نعرف أن الفوتون سيصطدم بالمرآة العليا، وبذا فإن المسار الذي رسمناه له صحيح. ينعكس الفوتون على المرآة العليا وينتقل مرة أخرى في مسارٍ قطري ليصطدم بالمرآة السفلى لتدق الساعة المنزلقة. والنقطة البسيطة لكنها أساسية هي أن المسار القطري المزدوج الذي نرى الفوتون يقطعه أطول من المسار العمودي من أسفل وأعلى الذي يتخذه الفوتون في الساعة الساكنة. ويجب أن يقطع الفوتون في الساعة المنزلقة مسافة في الاتجاه الأيمن بالإضافة إلى المسافة التي يقطعها من أسفل وأعلى، وذلك من منظورنا. والأكثر من ذلك فإن ثبات سرعة الضوء ينبئنا أن فوتونات الساعة المنزلقة تنتقل بنفس سرعَة فوتونات الساعة الساكنة. وحيث أن على فوتونات الساعة المنزلقة أن تنتقل مسافة أبعد لإحداث دقة واحدة، فإن معدل دقاتها سيكون أقل. ويوضح هذا الجدل البسيط كيف أن الساعة الضوئية المتحركة، من منظورنا، تدق أبطأ من الساعة الضوئية الساكنة. وحيث أننا كنا قد اتفقنا على أن عدد الدقات يعكس مباشرة كم مضى من الزمن، فإننا سنرى أن مرور الزمن قد صار أبطأ بالنسبة للساعة المتحركة.

الشكل رقم (2-3)



فوتون الساعة المنزلقة ينتقل في مسار قطري من منظورنا.

وقد تتساءل عما إذا كان ذلك يعكس فقط بعض السمات الخاصة للساعات الضوئية ولا ينطبق على ساعات أجدادنا أو ساعات رولكس. وهل سيتباطأ الزمن المقيس بهذه الساعات المألوفة كذلك؟ والإجابة هنا هي نعم مدوية، كما هو واضح من تطبيق مبدأ النسبية. لنضع ساعة رولكس على كل من الساعتين الضوئيتين، ونعيد إجراء التجارب السالفة مرة أخرى. وكما سبق أن ناقشنا فإن الساعة الضوئية الساكنة وساعة رولكس الموضوعة فوقها ستبينان انقضاء زمنين

متماثلين بحيث تقابل كل مليار دقة من الساعة الضوئية ثانية واحدة في ساعة رولكس. لكن ما هو الحال بالنسبة للساعة الضوئية المتحركة وساعة رولكس الموضوعة فوقها؟ وهل سيتباطأ معدل دقات ساعة رولكس لتتزامن مع الساعة الضوئية الموضوعة فوقها؟ حسناً، وحتى نقوي من اقتناعنا بهذه النقطة، فلنتخيل أن الساعة الضوئية وساعة رولكس المرتبطة بها تتحركان لأنهما مثبتتان في أرضية عربة قطار بلا نوافذ ينزلق على القضبان في خط مستقيم تماماً وبنعومة فائقة وسرعة ثابتة. ولا توجد وسيلة تبعاً لمبدأ النسبية يستطيع أن يتحقق بها أي راصد داخل القطار من أي تأثير لحركة هذا القطار. لكن إذا فقدت الساعتان الضوئية ورولكس تزامنهما فسيكون لذلك تأثيراً ملحوظاً بالتأكيد. وهكذا فإن الساعة الضوئية المتحركة وساعة رولكس المثبتة عليها لابد أن تسجلا نفس الفترة الزمنية، أي أن ساعة رولكس لابد أن تتباطأ بنفس الشكل الذي تتباطأ به الساعة الضوئية. وبدون النظر إلى النوع أو الماركة أو التركيبة، فإن الساعات التي تتحرك بعضها بالنسبة لبعض تسجل مرور الزمن بمعدلات مختلفة.

كما أن المناقشات حول الساعة الضوئية توضح كذلك أن الفرق الدقيق في الزمن بين الساعة الساكنة والساعة المتحركة يعتمد على طول المسافة التي يجب أن يقطعها فوتون الساعة المنزلقة ليكمل بها كل دورة. ويعتمد ذلك بدوره على سرعة حركة الساعة المنزلقة - من وجهة نظر راصد ساكن، فكلما ازدادت سرعة انزلاق الساعة كلما بعدت المسافة التي يجب على الفوتون قطعها في اتجاه اليمين. ونستنتج من ذلك أن معدل دقات الساعة المنزلقة بالنسبة للساعة الساكنة لابد أن يصبح أقل فأقل كلما تحركت أسرع فأسرع[5].

---

(5) وللقارئ ذي الميول الرياضية، نسجل أن هذه المشاهدات يمكن أن تتحول إلى مقولات كمية. فمثلاً إذا كانت سرعة الساعة الضوئية المتحركة ν ويستغرق الفوتون t ثانية لإتمام دورة واحدة كاملة (كما قيست بواسطة ساعتنا الضوئية الساكنة)، فتكون الساعة الضوئية قد قطعت مسافة قدرها νt عندما يعود الفوتون إلى المرآة السفلى. ويمكن أن نستخدم نظرية فيثاغورس لحساب طول كل من المسار القطري في الشكل رقم (2-3) وهو حيث $\sqrt{(\nu\, t/_2)^2 + h^2}$ المسافة بين المرآتين في الساعة الضوئية (وهي 6 بوصات كما ورد في المتن). وبذلك يكون طول المسارين القطريين هو $2\sqrt{(\nu\, t/_2)^2 + h^2}$. وحيث أن سرعة الضوء لها قيمة ثابتة ويرمز لها اصطلاحاً بـc، فإن الضوء سيستغرق $2\sqrt{(\nu\, t/_2)^2 + h^2/c}$ ثانية ليكمل رحلة المسارين القطريين. وبذا نحصل على المعادلة $t = 2\sqrt{(\nu\, t/_2)^2 + h^2/c}$ والتي يمكن حلها بالنسبة لـ t لتعطي $t = 2^h\sqrt{c^2 - \nu^2}$ ولتجنب اللبس، لنكتب الآتي $t = 2h\sqrt{c^2 - \nu^2}$ (للمتحرك)، حيث يشير الرمز السفلي إلى الزمن الذي يقاس لحدوث دقة واحدة في الساعة المتحركة. ومن جهة أخرى، فإن زمن الدقة الواحدة في الساعة الساكنة هو $t = 2^h/_c$ ساكن. وكما يُبين الجبر البسيط. $t/\sqrt{1 - \nu^2/_{c^2}}$ (ساكن) $t =$ (متحرك) وهو ما يدل مباشرة على أن دقة واحدة في الساعة المتحركة =

وللإحساس بالمقياس المستخدم نلاحظ أن الفوتون يقطع دورة كاملة في حوالى جزء من مليار من الثانية. وحتى تتمكن الساعة من الانتقال مسافة معقولة في الزمن الذي تستغرقه دقة واحدة فلا بد وأن تنتقل بسرعة مذهلة - أي بكسر ملحوظ من سرعة الضوء. ولو كانت تنتقل بسرعة اعتيادية أكثر مثل عشرة أميال في الساعة، فإن المسافة التي ستقطعها في اتجاه اليمين في زمن دقة واحدة في غاية الضآلة - حوالى 15 جزء من المليار من القدم فقط. وتصبح المسافة الزائدة التي يجب أن يقطعها الفوتون المنزلق ضئيلة جداً، وبالتالي فإن تأثيرها في معدل دقات الساعة المتحركة سيكون هو الآخر ضئيلاً جداً. ومرة أخرى، وبناءً على مبدأ النسبية، فإن هذا الأمر صحيح لكل الساعات - أو بمعنى آخر للزمن نفسه. وهذا هو السبب في أن الكائنات - مثلنا - التي تنتقل بعضها بالنسبة لبعض بمثل تلك السرعات البطيئة، لا تدرك التغيرات في مرور الزمن. فالتأثيرات جد ضئيلة على الرغم من تأكدنا من وجودها. ومن جهة أخرى، إذا استطعنا أن نتعلق ممسكين بالساعة المنزلقة ونتحرك معها بسرعة تماثل ثلاثة أرباع سرعة الضوء مثلاً، فإنه يمكن استخدام معادلات النسبية الخاصة لتوضيح أن الراصدين الساكنين سيشاهدون ساعتنا المتحركة تدق بمعدل يساوي تقريباً ثلثي معدل دقات ساعتهم، وهو بالتأكيد تأثير بيِّن.

خامساً: الانشغال بالحياة

لقد رأينا أن ثبات سرعة الضوء يعني أن الساعة الضوئية المتحركة تدق أبطأ من الساعة الضوئية الساكنة. وبناءً على مبدأ النسبية، فإن هذا الأمر ليس صحيحاً فقط في حالة الساعات الضوئية، ولكنه صحيح كذلك لأية ساعة - ولابد أن يكون صحيحاً للزمن نفسه. ويمر الزمن أكثر بطءاً لشخص يتحرك مما بالنسبة لشخص ساكن. فإذا كان المنطق البسيط الذي أوصلنا إلى هذا الاستنتاج سليماً، فهل يمكن لشخص أن يحيا لمدة أطول كونه متحركاً مما لو كان ساكناً؟ وفي النهاية، إذا كان الزمن يمر أكثر بطءاً لشخص ما يتحرك مما بالنسبة لشخص ساكن، فإن هذا التباين يجب ألا ينطبق فقط على الزمن الذي تقيسه الساعات، ولكن كذلك بالنسبة للزمن الذي تقيسه ضربات القلب وتحلل أجزاء الجسم. هذا هو الحال كما تم التأكد منه مباشرة - ليس في ما يتعلق بالعمر المتوقع للإنسان،

= تستغرق وقتاً أطول من الساعة الساكنة. ويعني ذلك أنه بين حدثين مختارين فإن العدد الكلي للدقات سيكون أقل في حالة الساعة المتحركة منه في الساعة الساكنة، مؤكداً أن وقتاً أقل قد انصرم بالنسبة للمشاهد المتحرك.

ولكن بالنسبة لجسيمات معينة من العالم الأصغر: الميونات (Muons). غير أن هناك نقطة هامة تحول دون أن ندعي أننا قد وقعنا على منبع دائم للشباب.

عندما تجلس الميونات باسترخاء في المختبر، فإنها تتحلل في عملية قريبة الشبه بالتحلل الإشعاعي في زمن متوسط حوالي جزءين من مليون من الثانية ($\frac{2}{1000000}$ من الثانية). وهذا التفكك من الحقائق التجريبية المدعمة بكمية هائلة من الأدلة. ويبدو الأمر وكأن الميون يعيش حياته ببندقية مصوبة إلى رأسه، وعندما يصل عمره إلى جزءين من المليون من الثانية يضغط على الزناد ويتحول إلى أشلاء من الإلكترونات والنيوترينوات . أما إذا لم تكن هذه الميونات ساكنة في المختبر، بل متنقلة خلال أحد الأجهزة المعروفة باسم مسرِّع الجسيمات الذي يدفعها إلى سرعات قريبة من سرعة الضوء، فإن متوسط عمرها المتوقع يزداد بشكل مذهل كما تم قياسه بواسطة العلماء في المختبر. وهو الأمر الذي يحدث "في الواقع". فعند سرعة تصل إلى 667 مليون ميل في الساعة (99,5٪ من سرعة الضوء) سنشاهد زيادة عمر الميون عشر مرات. وتفسير ذلك تبعاً للنسبية الخاصة هو أن "ساعات اليد" التي تحملها الميونات تدق أبطأ كثيراً من ساعات المختبر. وبعد زمن طويل من توقع ساعات المختبر للميونات أن تضغط على الزناد وتنفجر فإن ساعات الميونات سريعة الحركة تعلن أن وقت النهاية لم يحن بعد. ويمثل ذلك استعراضاً مباشراً ودرامياً جداً لتأثير الحركة في مرور الزمن. فإذا أمكن أن يتحرك الناس بنفس سرعة الميونات فإن العمر المتوقع لهم سيزداد بنفس الدرجة. وبدلاً من أن يعيشوا 70 سنة، فإنهم سيعيشون 700 سنة[6].

والآن، لنضع يدنا على صلب الموضوع؛ فعلى الرغم من أن الراصدين في المختبر يرون أن الميونات سريعة الحركة تعيش أطول من أخواتها الساكنة، فإن هذا يرجع إلى بطء سريان الزمن بالنسبة للميونات المتحركة. ولا ينطبق بطء الزمن على الساعات الموجودة مع الميونات فقط، بل كذلك على كل الأنشطة التي تقوم

(6) في حالة ما إذا كنت تريد اقتناعاً أكثر بتجربة أقل خصوصية من تجربة مسرِّع الجسيمات، إليك الآتي. في تشرين الأول/أكتوبر 1971 قام كل من ج.س هافيل، الذي كان في جامعة واشنطن في سانت لويس، وريتشارد كينغ من مرصد البحرية للولايات المتحدة، بوضع ساعات ذرية ذات شعاع السيزيوم على متن طائرات تجارية طارت بها حوالي 40 ساعة. وبعد أن أخذا في اعتبارهما بعض السمات الدقيقة المتعلقة بتأثير الجاذبية (سنناقشها في الفصل التالي) وتزعم النسبية الخاصة أن الزمن الكلي المنصرم الذي تسجله الساعة الذرية المتحركة لا بد من أن يكون أقل من الزمن المنصرم والمسجل بساعة مماثلة ساكنة على الأرض ببضع مئات الأجزاء من المليار من الثانية. وهذا بالضبط ما وجده هافيل وكينغ: يتباطأ الزمن بالفعل في الساعة المتحركة.

بها. فمثلاً، إذا كان الميون الساكن يتمكن من قراءة 100 كتاب خلال عمره القصير، فإن ابن عمه سريع الحركة سيتمكن هو الآخر من قراءة نفس المائة كتاب، لأنه على الرغم من حياته الأطول كما يبدو من حياة الميون الساكن، إلا أن معدل قراءته - وبالمثل كل شيء آخر في حياته - قد تباطأ كذلك. ومن منظور المختبر، يبدو الأمر وكأن الميون المتحرك يعيش حياته بالعرض البطيء. ومن هذا المنطلق فإن الميون المتحرك سيعيش أطول من الساكن، لكن "كمية الحياة" التي سيمارسها كل منهما متساوية تماماً. ويسري نفس الاستنتاج طبعاً على الأفراد سريعي الحركة ذوي العمر المتوقع البالغ عدة قرون. فمن منظورهم الحياة كما هي، لكن من منظورنا فإنهم يعيشون حياة بالعرض البطيء جداً، وعليه فإن دورة حياتهم العادية ستستغرق فترة هائلة من الزمن بمقياسنا.

سادساً: وعلى أي حال، من الذي يتحرك؟

تمثل الحركة النسبية مفتاح فهم نظرية آينشتاين ومصدراً مرجحاً للاضطراب. ولعلك قد لاحظت أن المنظور المعكوس يبدل أدوار الميونات "المتحركة"، التي تجادلنا حول ساعاتها التي تسير ببطء، مع نظيراتها "الساكنة". وبالضبط كما في حالة جورج وغريس حيث لكل منهما نفس الحق في أن يعلن أنه هو الساكن والآخر هو المتحرك، فإن الميونات التي وضعناها كمتحركة لها الحق تماماً في أن تدعي، من منظورها، أنها لا تتحرك بينما الميونات "الساكنة" هي التي تتحرك في الاتجاه العكسي. ويمكن تطبيق نفس البراهين هنا بنفس الدرجة من اليقين انطلاقاً من هذا المنظور، الأمر الذي يؤدي إلى الاستنتاج العكسي ظاهرياً، أي أن الساعات المحمولة على الميونات التي أطلقنا عليها ساكنة تسير ببطء مقارنة بالساعات المحمولة على الميونات التي وصفناها بأنها متحركة.

وقد قابلنا موقفاً من قبل، وهو موقف احتفالية التوقيع في ضوء المصباح، حيث كانت هناك وجهتا نظر مختلفتان، الأمر الذي أدى إلى نتائج مضادة تماماً. وفي تلك الحالة كنا مجبرين من منطلق منطق النسبية الخاصة أن نتنازل عن الفكرة الراسخة عند كل إنسان، وهي الاتفاق حول أن الأحداث تقع في نفس الوقت بصرف النظر عن حالة الحركة. ومع ذلك فإن التعارض الحالي يبدو هو الأسوأ. كيف يمكن أن يدعي راصدان أن ساعة الآخر هي الأبطأ؟ والأكثر غرابة هو أن منظور الميونات المختلف، والذي هو صادق بنفس الدرجة، يبدو أنه يؤدي بنا إلى استنتاج أن كل مجموعة سوف تدعي بشدة وبكل أسف أنها ستموت أولاً.

ونحن نعلم أن العالم يمكن أن يتصف ببعض الصفات الغريبة غير المتوقعة، لكننا نأمل ألاً يعبر بنا ذلك إلى عالم من المنطق المنافي للعقل. وبذا ما الذي يحدث؟

بكل هذه التناقضات الظاهرية الناتجة عن النسبية الخاصة، وبالفحص الدقيق، فإن هذه المعضلات المنطقية تؤدي بنا إلى الكشف عن دخائل جديدة في عمل الكون. ولتجنب الاستغراق في التجسيد البشري أكثر من ذلك، لندع الميونات ونعود إلى جورج وغريس، اللذين يحملان الآن ساعتين رقميتين بالإضافة إلى الأضواء المتوهجة على بذلة الفضاء لكل منهما. ومن منظور جورج فإنه هو الساكن بينما غريسي بأضوائها الخضراء المتوهجة وساعتها الرقمية تبدو عن بعد مقتربة منه ثم تعبره في ظلمات الفضاء الخاوي. ويلاحظ جورج أن ساعة غريس أبطأ مقارنة بساعته (بمعدل بطء يعتمد على سرعة مرورهما أحدهما بالآخر). ولو كان جورج لمّاحاً أكثر لكان قد لاحظ كذلك أن كل شيء عند غريس - بما في ذلك الطريقة التي حيته بها عند مرورها والسرعة التي غمزت بها بعينيها، إلخ - يحدث بحركة بطيئة، هذا بالإضافة إلى بطء مرور الزمن في ساعتها. ومن منظور غريس فإن نفس المشاهدات تنطبق على حالة جورج.

ومع أن ذلك يبدو متناقضاً، دعنا نحاول أن نضع أيدينا على تجربة دقيقة يمكن أن تزيح جانباً المنطق المنافي للعقل. وأبسط الطرق لتنظيم الأمور هي أن نجعل كل من جورج وغريس يضبط ساعته عند الثانية عشرة بالضبط في لحظة مرورهما أحدهما بالآخر. وعندما يتباعدان فإن كلاً منهما سيدعي أن ساعة الآخر أبطأ. ولمواجهة هذا النزاع بطريقة مباشرة، فإن جورج وغريس لابد أن يلتقيا مرة ثانية، ويقارنا مباشرة الزمن المنقضي بواسطة ساعتيهما لحظة اللقاء. لكن كيف يمكن أن يقوما بذلك؟ حسناً، فجورج لديه محرك نفاث يمكن استخدامه للحاق بغريس من منظوره. لكنه إن يفعل ذلك فإن التماثل بين منظوريهما والمتسبب في التناقض الظاهر سينكسر، حيث أن جورج سيخضع لحركة متسارعة وليست حرة. وعندما يلتقيان بهذا الشكل فإن الوقت الذي سيمضي على ساعة جورج سيكون الأقل حتمياً، لأنه يمكن أن يقول بكل ثقة أنه هو المتحرك لإحساسه بذلك. ولم يعد منظورا جورج وغريس متكافئين بعد الآن. فإن جورج يفقد حقه في الادعاء بأنه ساكن بمجرد إطلاق محركه النفاث.

وإذا تعقب جورج غريس بهذا الشكل، فإن الفرق في الزمن بين ساعتيهما سيعتمد على سرعتهما النسبية وتفاصيل استخدام جورج للمحرك النفاث. وإذا كانت السرعات المعنية صغيرة، كما هو الحال الآن، فإن الفرق سيكون متناهي

الصغر. أما إذا كانت السرعات المعنية تمثل أجزاء محسوسة من سرعة الضوء، فإن الفرق يمكن أن يصبح دقائق أو أياماً أو سنوات أو قروناً أو أكثر من ذلك. وكمثال قوي على ذلك، تخيل أن السرعة النسبية لجورج وغريس عندما يعبر كل منهما بالآخر مبتعدين هي 99.5٪ من سرعة الضوء. وبعد انتظار 3 سنوات - وفقاً لساعة جورج - قد انقضت قبل أن يطلق محركه النفاث ليندفع في التو للحاق بغريس بنفس السرعة التي كانا يتحركان بها مبتعدين وهي 99.5٪ من سرعة الضوء. ستمر ست سنوات بساعة جورج عندما يصل إلى غريس حيث أنه سيستغرق 3 سنوات للحاق بها. غير أن رياضيات النسبية الخاصة ستبين أنه قد انقضت ستون سنة بساعة غريس. وليست هذه ببراعة: فإن على غريس أن تستحضر ذاكرتها ما يقرب من 60 سنة مضت لتتذكر لقاءها بجورج في المكان. ومن ناحية أخرى لم تكن سوى 6 سنوات قد مضت. وبالمعنى الصحيح فإن حركة جورج قد جعلته مسافراً في الزمن، ففي الواقع، وبشكل دقيق جداً، فإن جورج قد ارتحل إلى عالم المستقبل لدى غريس.

قد يبدو أن المقارنة المباشرة للساعتين معاً مجرد أمر مسبب للإزعاج، لكنه في الواقع في صلب الموضوع. ويمكننا تخيل عدد من الحيل المختلفة لاحتواء الصدع الموجود في درع التناقض، لكنها جميعاً قد فشلت في النهاية. فمثلاً، بدلاً من جمع الساعتين معاً، ماذا لو قارن جورج وغريس ساعتيهما بواسطة الاتصال بالتليفون المحمول؟ فإذا كان مثل هذا الاتصال لحظياً فسنواجه بعدم تطابق لا يمكن تجاوزه: فانطلاقاً من منظور غريس فإن ساعة جورج ستكون هي الأبطأ، ولذلك فهو لابد أن يتصل بعد مرور زمن أقل، وانطلاقاً من منظور جورج فإن ساعة غريس هي الأبطأ ولذلك فهي لابد أن تتصل بعد مرور زمن أقل. ولا يمكن أن يكون الاثنان على صواب، ونترك نحن في حيص بيص. والنقطة الجوهرية هنا هي أن كل التليفونات المحمولة مثلها مثل كل وسائل الاتصال لا تبث إشاراتها لحظياً. والتليفونات المحمولة تعمل بموجات الراديو، وهي شكل من أشكال الضوء، وبذلك فإن إشاراتها تنتقل بسرعة الضوء. ويعني ذلك أن الأمر يستغرق بعض الوقت حتى تستقبل الإشارات التأخر في الوقت الذي يكفي بالكاد ليسبب توافق المنظورين أحدهما مع الآخر.

ولنفكر في ما يلي أولاً من منظور جورج: تخيل أن جورج يبث كل ساعة، في بداية الساعة، في تليفونه المحمول المقولة: "الساعة الآن الثانية عشرة وكل شيء على ما يرام" و"الساعة الآن الواحدة وكل شيء على ما يرام"، وهكذا.

وحيث أنه من منظوره تسير ساعة غريس أبطأ، فلأول وهلة يفكر جورج أن غريس ستتلقى هذه الرسائل قبل أن تعلن ساعتها نفس الوقت. وبهذه الطريقة فإنه يستنتج أن على غريس أن توافق على أن ساعتها هي الأبطأ. لكنه يعاود التفكير في ذلك: "حيث أن غريس تبتعد عني، فإن الإشارة التي أبثها إليها بواسطة التليفون المحمول لابد أن تقطع مسافة أطول لتصل إليها. وربما يعوض زمن قطع هذه المسافة الإضافية البطء في ساعتها". ويدفع يقين جورج بأن هناك تأثيرين متنافسين - البطء في ساعة غريس مقابل زمن انتقال إشارته هو - إلى البدء في العمل بصورة كمية لاستيضاح تأثيرهما المشترك. ويجد جورج أن تأثير زمن الانتقال يزيد على ما هو مطلوب لتعويض البطء في ساعة غريس. ويتوصل إلى استنتاج مدهش، هو أن غريس ستستقبل إشارته معلنة مرور ساعة واحدة بساعته هو "بعد" أن تكون الساعة المعلنة قد انقضت بساعتها هي. وفي الحقيقة، وحيث أن جورج يدرك أن غريس خبيرة في الفيزياء، فإنه يعلم أنها ستأخذ زمن انتقال الإشارة في اعتبارها عند توصلها إلى نتائج تتعلق بساعته بناءً على اتصاله بالتليفون المحمول. وبقليل من الحسابات الكمية وبالأخذ في الاعتبار زمن انتقال الإشارة فإن تحليلات غريس لإشارات جورج ستوصلها إلى نتيجة مفادها أن ساعة جورج تدق أبطأ من ساعتها.

وينطبق نفس المنطق بالضبط إذا تناولنا منظور غريس، وكونها ترسل إشارات كل ساعة لجورج. وفي البداية فإن البطء في ساعة جورج من منظور غريس سيوصلها إلى نتيجة مفادها أنه سيستقبل رسائلها كل ساعة قبل أن يبث هو إشاراته. لكنها عندما تأخذ في الحسبان المسافة الأطول التي ستقطعها إشاراتها حتى تصل إلى جورج وهو يتراجع في الفضاء، فإنها ستتيقن أن جورج سيستقبل تلك الإشارات فعلياً "بعد" أن يكون قد أرسل هو بإشارته. ومرة أخرى تتيقن هي أنه حتى لو أخذ جورج في اعتباره زمن انتقال الإشارة فإنه سيستنتج من اتصال غريس بالتليفون المحمول أن ساعتها تسير أبطأ من ساعته.

وطالما ظل جورج وغريس يتحركان بلا تسارع فإن منظور كل منهما على قدم المساواة تماماً. وحتى إن بدا ذلك تناقضاً، فإن كليهما سيفكر أنه على صواب تماماً في اعتقاده أن ساعة الآخر تسير أبطأ من ساعته.

سابعاً: تأثير الحركة في الفضاء

توضح المناقشات السابقة أن الراصدين يرون أن الساعات المتحركة تدق أبطأ من ساعاتهم هم - أي أن الزمن يتأثر بالحركة. وبخطوة صغيرة يمكن أن نرى أن

للحركة نفس التأثير القوي في الفضاء. ولنعد إلى سليم وجيم في مضمار السباق. في حين قام سليم بقياس طول سيارته الجديدة بعناية في صالة العرض بواسطة شريط قياسي. ولا يستطيع جيم استخدام نفس الطريقة بينما يسير سليم مسرعاً بسيارته في مضمار السباق، ولذا لا بد أن يجد طريقة غير مباشرة. وقد سبق أن أشرنا إلى مثل هذه الطريقة، وهي: يبدأ جيم في تشغيل ساعة الإيقاف بمجرد وصول مقدمة السيارة (حاجز الصدمات الأمامي) عنده، ويوقف الساعة عند وصول مؤخر السيارة (حاجز الصدمات الخلفي). وبضرب الزمن المنقضي في سرعة السيارة يستطيع جيم أن يحسب طول السيارة.

وباستخدام ما توصلنا إليه حديثاً من تقدير لترويض الزمن، فإننا نوقن أنه من منظور سليم فإنه الساكن بينما جيم هو المتحرك، وعليه فإن سليم يرى أن ساعة جيم تسير ببطء، ونتيجة لذلك يوقن سليم أن القياس غير المباشر الذي أجراه جيم لطول السيارة سيعطي نتيجة أقصر من الطول الذي قاسه هو في صالة العرض، وذلك لأنه في حسابات جيم (الطول يساوي السرعة مضروبة في الزمن المنصرم) يقوم جيم بقياس الزمن بساعة تعمل ببطء. فإذا كانت الساعة تعمل ببطء فإنها ستسجل زمنا أقل ونتيجة للحسابات سيصبح طول السيارة أقصر.

وبذلك سيكتشف جيم أن طول سيارة سليم أثناء الحركة أقصر من طولها في حالة السكون. وهذا مثال على الظاهرة العامة التي يرى المشاهدون فيها أن الجسم المتحرك يقصر في اتجاه الحركة. فمثلاً تبين معادلات النسبية الخاصة أنه إذا تحرك جسم بسرعة مساوية تقريباً 98٪ من سرعة الضوء، فإن الراصد الساكن سيرى أن الجسم قد قصر بمقدار 80٪ عن طوله في حالة السكون. ويصور الشكل رقم (2-4) هذه الظاهر[7].

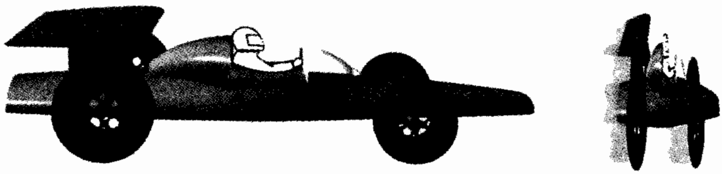
ثامناً: الحركة خلال الزمكان (Spacetime)

أدى ثبات سرعة الضوء إلى إحلال النظرة التقليدية للزمان والمكان كبنى جامدة وموضوعية بمفهوم جديد يعتمد فيه الزمان والمكان بشكل خاص على

(7) بالرغم من أن الشكل رقم (2-4) يصور بالضبط انكماش جسم على طول اتجاه حركته، فإن الصورة لا تعكس ما نراه فعلياً إذا كان جسم ما سيمرق بسرعة قريبة من سرعة الضوء (مفترضين أن إبصارنا أو الأجهزة الفوتوغرافية كانت على درجة من الدقة لترى أي شيء على الإطلاق!) وحتى نرى أي شيء بأعيننا - أو بواسطة آلة تصوير - لا بد من أن نستقبل الضوء الذي انعكس من سطح الجسم. وحيث أن الضوء المنعكس يصل إلينا من مواضع مختلفة على الجسم، فإن الضوء الذي نراه في أية لحظة يتخذ مسارات مختلفة الأطوال. ويؤدي ذلك إلى نوع من الخداع البصري النسبي الذي يظهر فيه الجسم وكأنه يقصر ويدور.

الحركة النسبية بين الراصد والمرصود. ويمكن أن ننهي مناقشتنا هنا بعد أن أيقنا أن الأجسام المتحركة تبطئ من حركتها ويقصر طولها في اتجاه الحركة. وبذا فإن النسبية الخاصة تعطي منظوراً أكثر تجانساً ليحتوي هذه الظواهر.

الشكل رقم (2-4)

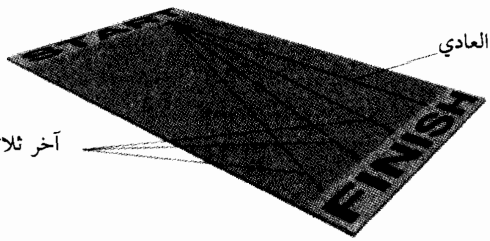


يقصر طول الجسم المتحرك في اتجاه حركته.

وحتى نفهم هذا المنظور، لنتخيل سيارة غير عملية تستطيع أن تصل إلى سرعة فائقة مقدارها 100 ميل في الساعة ثم تظل محتفظة بهذه السرعة لا أكثر ولا أقل إلى أن يتوقف المحرك وتسير متباطئة حتى تتوقف تماماً، ولنتخيل أيضاً أنه نتيجة للشهرة التي حققها سليم كسائق ماهر فقد طُلب منه أن يختبر سيارة في طريق طويل مستقيم وعريض موجود في منتصف منطقة صحراوية منبسطة. وحيث أن المسافة بين البداية والنهاية 10 أميال، فإن السيارة ستقطع هذه المسافة في $\frac{1}{10}$ ساعة، أي في 6 دقائق. وسيقوم جيم الذي يشتهر كمهندس سيارات بفحص البيانات المسجلة من العشرات من سائقي اختبار السيارات، وقد انزعج لأنه وجد أن عدداً قليلا من السيارات الأخيرة قد سجل زمناً أطول إلى حد كبير: 6,5، 7، وحتى 7,5 دقيقة، بالرغم من أن معظم السائقين يسجلون 6 دقائق. وقد شك في البداية في وجود مشكلة ميكانيكية، حيث تبين الأرقام الأخيرة للسيارات الثلاث أنها كانت تسير بسرعة أبطأ من 100 ميل في الساعة. لكن بعد فحص دقيق للسيارات اقتنع بأنها في حالة ممتازة. ولعجزه عن تفسير الأزمنة الأطول الشاذة، فإنه استشار سليم وسأله حول الاختبارات القليلة الأخيرة. كان عند سليم تفسير بسيط. قال سليم لجيم، بما أن المضمار يمتد من الشرق إلى الغرب، وكلما تقدم الوقت نهاراً فإن الشمس تصبح في مواجهة عينيَّ.. في حالة التجارب الثلاث الأخيرة كانت الشمس فظيعة لدرجة أنه قاد السيارة من بداية المضمار إلى نهايته منحرفاً بزاوية طفيفة. ورسم شكلاً تقريبياً للمسار الذي اتخذه في التجارب الثلاث الأخيرة كما هو مبين في الشكل رقم (2-5). أصبح تفسير الأزمنة الأطول للتجارب الثلاث الأخيرة واضحاً تماماً: فعندما تنتقل بزاوية يصبح المسار بين

البداية والنهاية أطول لنفس السرعة التي مقدارها 100 ميل في الساعة، وعليه ستحتاج لمزيد من الزمن لقطعها. وإذا وضعنا المسألة بشكل آخر، فإن الانتقال بزاوية يؤدي إلى أن يستهلك جزء من سرعة المائة ميل في الساعة في الانتقال من الجنوب إلى الشمال تاركاً جزءًا أقل من الرحلة بين الشرق والغرب. ويعني ذلك أن قطع المضمار سيستغرق وقتاً أطول.

الشكل رقم (2-5)



قاد سليم السيارات الثلاث الأخيرة بزاوية متزايدة بسبب توهج الشمس في وجهه في فترة بعد الظهيرة.

ومن السهل فهم تفسير سليم كما هو مذكور، ويستحق الأمر إعادة صياغة بشكل طفيف من أجل النقلة في المفاهيم التي نحن على وشك اتخاذها. فالاتجاهان شمال - جنوب وشرق - غرب بعدان مكانيان مستقلان يمكن أن تتحرك فيهما السيارة. (ويمكن كذلك أن تتحرك رأسياً إذا كانت تصعد جبلاً مثلاً، لكننا لن نحتاج إلى هذه المقدرة هنا). ويصور تفسير سليم أنه بالرغم من أن السيارة تسير بسرعة 100 ميل في الساعة كل مرة إلا أنها قد اقتسمت هذه السرعة بين البعدين المذكورين خلال التجارب القليلة الأخيرة، ولذا فقد بدا أنها تسير بسرعة أبطأ من 100 ميل في الساعة في اتجاه شرق - غرب. وفي أثناء التجارب الأولى كانت كل سرعة المائة ميل في الساعة مكرسة فقط للحركة في اتجاه شرق - غرب، أما في أثناء التجارب الثلاث الأخيرة فإن جزءًا من هذه السرعة قد استخدم في الحركة في الاتجاه شمال - جنوب.

وقد اكتشف آينشتاين أن هذه الفكرة بالضبط - فكرة انقسام الحركة بين أبعاد مختلفة - تكمن في أساس كل الفيزياء المميزة للنسبية الخاصة، طالما أننا موقنون بأنه ليس فقط الأبعاد المكانية هي التي تقتسم حركة الجسم، بل إن البعد الزماني يمكن أن يتقاسم هو الآخر هذه الحركة. وفي الحقيقة، تقع معظم حركة أي جسم

خلال الزمن وليس المكان في أغلب الظروف. دعنا نرى ما الذي يعنيه ذلك؟

نحن نعرف منذ بداية حياتنا مفهوم الحركة خلال المكان. ومع أننا لا نأخذ الأشياء بمثل هذه المفاهيم إلا أننا نعرف كذلك أننا وأصدقاءنا وممتلكاتنا إلخ نتحرك جميعاً خلال الزمن. وعندما ننظر إلى ساعة حائط أو ساعة يد، حتى لو كنا نجلس في تراخ نشاهد التليفزيون، نرى أن قراءات الساعة تتغير بصورة ثابتة، أي أنها "تتحرك للأمام خلال الزمن" بصورة ثابتة. فنحن وكل شيء من حولنا نتقدم في العمر، وقدرنا أن ننتقل من لحظة زمنية إلى لحظة تالية. وفي الحقيقة كان كل من عالم الرياضيات هيرمان مينكوفسكي Hermann Minkowski وكذلك آينشتاين في النهاية يدافعان عن فكرة أن الزمن هو بعد آخر للكون - البعد الرابع - وهو يشابه في ذلك بشكل أو بآخر الأبعاد المكانية الثلاثة التي نجد أنفسنا داخلها. ومع ذلك يبدو شيئا مجرداً (Abstract)، إلا أن مفهوم الزمن كبعد آخر مؤكد. فعندما نرغب في مقابلة شخص ما فإننا يمكن أن نخبره أين "في المكان" نتوقع أن نراه - فمثلاً في الطابق التاسع من المبنى الواقع على ناصية شارع 53 والجادة السابعة. وتوجد هنا ثلاث معلومات (الطابق التاسع، والشارع 53، والجادة السابعة) وهي تعكس الموقع المحدد في الأبعاد الثلاثة المكانية في الكون. وعلى نفس الدرجة من الأهمية كذلك تحديدنا للموعد الذي نقابله فيه (متى) وليكن في الثالثة بعد الظهر. وتنبئنا هذه المعلومة أين "في الزمن" سيكون لقاؤنا. وبذا فإن الأحداث تتحدد بأربع معلومات: ثلاث في المكان وواحدة في الزمان. وتحدد مثل هذه البيانات موقع الحدث في المكان والزمان أو اختصاراً في الزمكان. وبهذا المعنى فإن الزمن هو بعد آخر.

وحيث أن هذه الرؤية تتضمن أن الزمان والمكان هما ببساطة مثلان مختلفان للأبعاد، فهل نستطيع أن نتحدث عن سرعة جسم خلال الزمن بطريقة تماثل مفهوم السرعة خلال المكان؟ أجل نستطيع.

ويجيء الحل الكبير لكيفية عمل ذلك من معلومة مركزية تعاملنا معها من قبل. فعندما يتحرك جسم في المكان بالنسبة لنا فإن ساعته ستعمل ببطء مقارنة بساعتنا. بمعنى أن سرعة حركته خلال الزمن ستتباطأ. وهنا مربط الفرس: يعلن آينشتاين أن كل الأجسام في العالم دائما تنتقل خلال الزمكان بسرعة ثابتة - هي سرعة الضوء. وهي فكرة غريبة، فقد تعودنا على فكرة أن الأجسام تنتقل بسرعات أقل كثيراً من سرعة الضوء. وقد أكدنا على ذلك مراراً، كسبب لانعدام الألفة مع التأثيرات النسبية في حياتنا اليومية. وكل هذا صحيح. فنحن نتحدث حالياً عن سرعة الجسم المركبة خلال كل الأبعاد الأربعة - ثلاثة للمكان وواحد للزمان -

وأن سرعة الجسم من هذا المفهوم العام مساوية لسرعة الضوء. وحتى نستوعب ذلك بشكل كامل ونستوضح أهميته، فإننا نشير إلى أن السرعة الثابتة يمكن أن تتقاسمها أربعة أبعاد - أبعاد مكانية وزمانية مختلفة، كما في حالة السيارة ثابتة السرعة غير العملية المذكورة أعلاه. فإذا كان هناك جسم ثابت لا يتحرك (بالنسبة لنا) وعليه فهو لا يتحرك خلال المكان بالمرة، إذن، كما هو الحال في الاختبارات الأولى للسيارات، تُستهلك كل حركة الجسم للانتقال في بعد واحد - في هذه الحالة البعد الزمني. والأكثر من ذلك، فإن كل الأجسام الساكنة بالنسبة لنا وبالنسبة لبعضها البعض تتحرك خلال الزمن - أي تتقدم في السن - بنفس المعدل أو السرعة. فإذا كان جسم يتحرك خلال المكان، فإن هذا يعني كذلك أن بعضاً من الحركة السابقة خلال الزمن لابد أن يحيد. وكما في حالة السيارة التي تنتقل بزاوية فإن اقتسام الحركة يعني أن الجسم سينتقل بسرعة أبطأ من قرائنه الساكنة خلال الزمن، لأن بعضا من حركته يستخدم الآن في التحرك خلال المكان. أي أن ساعته ستدق بصورة أكثر بطءاً إذا تحرك خلال الزمن. وهذا بالضبط ما كنا قد وجدناه سابقاً. ونرى الآن أن الزمن يتباطأ عندما يتحرك جسم بالنسبة لنا لأن ذلك يحوِّل بعضاً من حركته خلال الزمن إلى حركة خلال المكان. وهكذا فإن سرعة الجسم خلال المكان هي مجرد انعكاس لكمية الحركة التي تحولت من حركته خلال الزمان(8).

ونرى كذلك أن هذا الإطار يتضمن في التو حقيقة وجود حد للسرعة

(8) وللقارئ ذي الميول الرياضية، فإننا نسجل هنا أنه من منطلق الزمكان 4 متجهات:

$$x = (ct, x_1, x_2, x_3) = (ct, \vec{x})$$

يمكن أن نحصل على سرعة 4-متجهات

$$u = dx/d\tau$$

حيث τ هي الوقت المناسب الذي يُعرَّف من

$$d\tau^2 = dt^2 - c^{-2}(dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2)$$

والسرعة خلال الزمكان هي مقدار u في المتجهات الأربع

$$\sqrt{((c^2 dt^2 - d\vec{x}^2)/(dt^2 - c^{-2} d\vec{x}^2)}$$

وهو مساوٍ تماماً لسرعة الضوء c. والآن يمكن إعادة ترتيب المعادلة:

$$c^2 (dt/d\tau)^2 - (d\vec{x}/d\tau)^2 = c^2$$

لتصبح

$$c^2 (d\tau/dt)^2 + (d\vec{x}/dt)^2 = c^2$$

ويبيِّن ذلك أن أي زيادة في سرعة الجسم خلال الفضاء $\sqrt{(d\vec{x}/dt)^2}$ لا بد وأن يصاحبها نقص في قيمة $d\tau/dt$ ، والأخيرة هي سرعة الجسم خلال الزمن (معدل سريان الزمان على ساعته الخاصة $d\tau$ مقارنة بساعتنا الساكنة dt).

المكانية للجسم: يصل الجسم إلى سرعته القصوى خلال المكان إذا تحولت كل حركته خلال الزمان إلى حركة خلال المكان. ويحدث ذلك عندما تتحول كل حركته السابقة التي لها سرعة الضوء خلال الزمن إلى حركة بسرعة الضوء خلال المكان. ولأنه يكون قد استخدم كل حركته خلال الزمن فإن هذه السرعة خلال المكان ستكون هي السرعة القصوى التي يمكن أن يصل إليها أي جسم. ويماثل ذلك حالة السيارة التي خضعت للاختبار في اتجاه شمال - جنوب. وكما أنه لا تتبقى سرعة للحركة في اتجاه البعد شرق - غرب، فإن أي شيء يتحرك بسرعة الضوء خلال المكان لن يتبقى له من السرعة ما يسمح بالحركة خلال الزمن. ولذا فإن الضوء لا يتقدم في العمر؛ فعمر الفوتون الذي انطلق لحظة الانفجار الهائل هو نفسه عمره الآن. فالوقت لا يمر عند سرعة الضوء.

تاسعاً: ماذا عن $E=mc^2$؟

مع أن آينشتاين لم يدعُ لنظريته تحت اسم "النسبية" (بل اقترح بدلاً من ذلك الاسم نظرية "عَدَم التغير" Invariance لتعكس خاصية عدم التغير في سرعة الضوء ضمن أشياء أخرى)، إلا أن معنى المصطلح قد أصبح واضحاً اليوم. وقد بينت أبحاث آينشتاين أن مفهومين مثل المكان والزمان، اللذين كانا يبدوان في الماضي وكأنهما منفصلان ومطلقان، هما في الواقع متداخلان ونسبيان. استرسل آينشتاين ليثبت بعد ذلك أن الخواص الفيزيائية الأخرى للعالم هي الأخرى متشابكة على غير المتوقع. وتزودنا معادلته الأشهر بواحد من أهم الأمثلة. وقد جزم آينشتاين في هذه المعادلة أن طاقة الجسم (E) وكتلته (m) ليستا مفهومين مستقلين؛ ويمكننا تعيين الطاقة بمعلومية الكتلة (بضرب الأخيرة في مربع سرعة الضوء c^2) كما يمكن تعيين الكتلة بمعلومية الطاقة (بقسمة الأخيرة على مربع سرعة الضوء c^2). وبمعنى آخر فإن الطاقة والكتلة - مثل الدولار والفرنك - عملتان قابلتان للتحويل إحداهما للأخرى. وعلى خلاف العملات، فإن معدل التغيير الذي يساوي مربع سرعة الضوء ثابت دائماً وإلى الأبد. ولأن معدل التغير المذكور كبير جداً (c^2 عدد كبير) فإن الكتلة الصغيرة تنتج طاقة هائلة. وقد اقتنص العالم المقدرة الهائلة المدمرة التي نتجت من تحويل أقل من 1٪ من رطلين من اليورانيوم إلى طاقة في هيروشيما في أحد الأيام. ويوماً ما قد نتمكن من تلبية حاجة العالم كله من الطاقة باستخدام معادلة آينشتاين والمصدر الذي لا ينتهي من مياه البحر من خلال الاندماج النووي.

ومن منطلق المفاهيم التي أكدنا عليها في هذا الفصل، فإن معادلة آينشتاين

تقدم لنا التفسير الأقوى والأصلب للحقيقة الرئيسية حول استحالة انتقال أي شيء أسرع من الضوء. وقد نتساءل مثلاً، لماذا لا نستطيع أن نعجّل جسماً مثل الميون لندفع سرعته إلى 667 مليون ميل في الساعة - 5.99٪ من سرعة الضوء - ثم "ندفعه" أكثر ليصل إلى 9.99٪ من سرعة الضوء، ثم ندفعه "بجد" بعد ذلك بصورة أقوى ليتخطى حاجز سرعة الضوء. وتفسر معادلة آينشتاين لماذا لا تنجح مثل هذه الجهود أبداً. فكلما زادت سرعة حركة جسم كلما زادت طاقته، ومن معادلة آينشتاين فإننا نرى أنه كلما زادت طاقة أي شيء كلما زادت كتلته. وعلى سبيل المثال، إذا كانت الميونات تنتقل بسرعة مساوية لـ 9.99٪ من سرعة الضوء فإنها ستزن أكثر كثيراً من أبناء عمومتها الساكنة. وفي الحقيقة فإنها ستكون أثقل بمقدار 22 مرة - حرفياً. (الكتل الواردة في الجدول رقم (1-1) هي للجسيمات الساكنة) غير انه كلما ازداد وزن الجسم يصعب أن نزيد من سرعته. فعندما تدفع طفلاً يركب دراجة هذا شيء، أما دفع سيارة نقل عملاقة فشيء آخر. وهكذا كلما تحرك الميون بسرعة أكبر يصبح الأمر أكثر صعوبة لزيادة تلك السرعة. وعند سرعة للميون تساوي 999.99٪ من سرعة الضوء، فإن كتلته تزيد بمقدار 224 مرة، أما عند 99999999.99٪ من سرعة الضوء فإن كتلته تزيد بمقدار 70000 مرة. وحيث أن كتلة الميون تزيد بدون حدود إذا اقتربت سرعته من سرعة الضوء، فإن الأمر سيتطلب دفعه بكمية لا نهائية من الطاقة لتصل أو تعبر حاجز سرعة الضوء. وهو بالطبع شيء مستحيل، وبذا لا يوجد أي شيء مطلقاً يستطيع الانتقال أسرع من الضوء.

وكما سنرى في الفصل التالي، فإن هذه النتيجة تضع بذور التعارض الرئيسي الثاني الذي واجه الفيزياء خلال القرن السابق، وتبشر في نهاية الأمر باختفاء نظرية موقرة وراسخة أخرى - نظرية الجاذبية الكونية لنيوتن.

الفصل الثالث

عن الاعوجاجات والتموجات

حل آينشتاين التناقض بين "حدس التقدم في العمر" حول الحركة وثبات سرعة الضوء، من خلال النسبية الخاصة. وباختصار يكمن الحل في كون حدسنا خاطئاً - فمن المعروف أن حركة الأشياء أبطأ كثيراً من سرعة الضوء، وأن مثل هذه السرعات المنخفضة تحجب الخواص الحقيقية للمكان والزمان. وتكشف النسبية الخاصة عن طبيعتهما وتبين أنهما يختلفان جذرياً عن المفاهيم السابقة لهما. ومع ذلك، لم تكن عملية تعديل فهمنا لأساسيات المكان والزمان أمراً هيناً. وسرعان ما أيقن آينشتاين أن من بين الأصداء العديدة التي تبعت ظهور النسبية الخاصة كانت هناك واحدة مدوية بشكل خاص: القول بأن لا شيء يمكن أن يسبق الضوء يبرهن على أنه لا يتفق مع نظرية نيوتن العالمية الموقرة عن الجاذبية، التي اقترحها نيوتن في النصف الثاني من القرن السابع عشر. وهكذا، في الوقت الذي تمكنت فيه النسبية الخاصة من حل أحد التناقضات، فإنها أوجدت تناقضاً آخر. وبعد عقد من العمل الشاق والمرهق في بعض الأحيان، تمكن آينشتاين من حل هذه المعضلة بواسطة نظريته في النسبية العامة. وفي هذه النظرية قام آينشتاين مرة أخرى بتثوير مفهومنا عن المكان والزمان، وذلك بإثبات أنه يحدث لهما اعوجاج وتشويه لنقل قوة الجاذبية.

أولاً: رؤية نيوتن للجاذبية

غيَّر إسحق نيوتن، المولود في العام 1642 في لينكولنشاير بإنكلترا، وجه البحث العلمي بأن أدخل قوة الرياضيات الكاملة في خدمة متطلبات الفيزياء. وكان نيوتن ذا ذكاء هائل لدرجة أنه عندما كان لا يجد الرياضيات التي يحتاجها في بعض بحوثه مثلاً، كان يخترعها. وقد مرت ثلاثة قرون تقريباً قبل أن يأتي إلى العالم عبقري علمي آخر يمكن مقارنته بنيوتن (يقصد المؤلف ستيفن هوكنغ). ومن بين اكتشافات نيوتن العديدة المدوية في ما يتعلق بعمل الكون فإن ما يهمنا هنا بالدرجة الأولى هي النظرية الكونية للجاذبية.

تعم قوى الجاذبية حياتنا اليومية. وهي التي تحفظنا وكل ما حولنا من أجسام مرتبطين بسطح الأرض، وهي التي تحفظ الهواء الذي نتنفسه من الهروب إلى الفضاء الخارجي؛ كما تحتفظ بالقمر في مداره حول الأرض وتحافظ على الأرض في مدارها حول الشمس. والجاذبية هي التي تفرض إيقاع الرقص الكوني من دون ملل أو كلل، وفي نظام دقيق رتيب يمارسه المليارات والمليارات من قاطني الكون من الكويكبات إلى الكواكب إلى النجوم فالمجرات. وقد تسببت ثلاثة قرون من تأثير نيوتن بأن نسلم بأن القوة الوحيدة - الجاذبية - هي المسؤولة عن هذا الثراء في الأحداث الأرضية والكونية. وقبل نيوتن لم يكن مفهوماً أن سقوط التفاحة من الشجرة على الأرض يشهد بأن نفس المبدأ الفيزيائي هو الذي يجعل الكواكب تدور حول الشمس. وقد قام نيوتن في خطوة جريئة لخدمة سيادة المنهج العلمي، بتوحيد الفيزياء التي تحكم كلا من السماوات والأرض، وأعلن أن قوى الجاذبية هي اليد الخفية التي تعمل في كل منهما.

ويمكن تسمية نظرة نيوتن للجاذبية بالموازن العظيم. فقد أعلن أن كل شيء على الإطلاق يمارس قوة جاذبية على كل شيء آخر على الإطلاق. ومن دون النظر للتركيب الفيزيائي للأشياء فإنها كلها تمارس قوى الجاذبية كما تحس بها. وقد استنتج نيوتن معتمداً على الدراسة العميقة لتحليل حركة الكواكب لجوهانس كبلر - أن شدة الجاذبية بين جسمين تعتمد "بالتحديد" على أمرين: كمية حشو كل جسم والمسافة بينهما. وكلمة "حشو" تعني المادة - التي تتكون من العدد الكلي للبروتونات والنيوترونات والإلكترونات، والتي بدورها تحدد "كتلة" الجسم. تجزم النظرية الكونية للجاذبية لنيوتن بأن شدة التجاذب بين جسمين كبيرة للأجسام ذات الكتل الكبيرة وصغيرة للأجسام ذات الكتل الصغيرة، كما تؤكد أيضاً أن شدة التجاذب تزيد إذا صغرت المسافة بين الجسمين وتقل إذا زادت المسافة بينهما.

انطلق نيوتن أبعد من هذا الوصف الكيفي وتوصل إلى معادلات تصف كمياً شدة قوة الجاذبية بين جسمين. وتنص هذه المعادلات - بالكلمات - أن قوة الجاذبية بين جسمين تتناسب طردياً مع حاصل ضرب كتلتيهما وعكسياً مع مربع المسافة بينهما. ويمكن استخدام "قانون الجاذبية" هذا للتنبؤ بحركة الكواكب والمذنبات حول الشمس وحركة القمر حول الأرض وحركة الصواريخ المنطلقة لاكتشاف الكواكب، بالإضافة إلى الاستخدامات الأرضية مثل مسار كرة البيسبول في الهواء والحركة اللولبية للاعبي الغطس أثناء اتجاههم إلى أسفل من على منصة القفز. والتوافق بين التنبؤات والمشاهدات الفعلية لحركة مثل هذه الأجسام مدهشٌ. وقد أعطى هذا النجاح دعماً لا لبس فيه لنظرية نيوتن حتى أوائل القرن العشرين.

غير أن اكتشاف آينشتاين للنسبية الخاصة أدى إلى ظهور ما ثبت أنه عقبة كؤود لنظرية نيوتن.

ثانياً: عدم التوافق بين جاذبية نيوتن والنسبية الخاصة

والسمة الرئيسية للنسبية الخاصة هي الحد المطلق للسرعة الذي يتحدد بواسطة الضوء. من المهم أن نتيقن من أن هذا الحد لا ينطبق فقط على الأجسام المادية، بل ينطبق كذلك على الإشارات وعلى كل التأثيرات من أي نوع. وببساطة لا توجد أية وسيلة لنقل المعلومات أو أي تأثيرات من مكان لآخر أسرع من الضوء. ومن الطبيعي أن العالم مليء بالطرق التي تنتقل بها التأثيرات بسرعات أبطأ من الضوء. فحديثك وكل الأصوات الأخرى مثلاً تحملها اهتزازات تنتقل في الهواء بسرعة 700 ميل في الساعة تقريباً، وهي سرعة بطيئة إذا قورنت بسرعة الضوء 670 مليون ميل في الساعة. ويصبح هذا الاختلاف في السرعة واضحاً إذا كنت تشاهد مباراة في البيسبول من المقاعد البعيدة عن مكان اللعب. فعندما يضرب اللاعب الكرة بمضربه فإن الصوت يصل إليك "بعد" لحظات من رؤيتك للضربة. ويحدث نفس الشيء في العاصفة الرعدية. فمع أن البرق والرعد يحدثان متزامنين، فإنك ترى البرق قبل أن تسمع الرعد. ومرة أخرى، يعكس ذلك الفرق المحسوس في السرعة بين الضوء والصوت. ويخبرنا النجاح الذي حققته النسبية الخاصة أن الوضع المعكوس، أي الذي تصلنا فيه بعض الإشارات قبل انبعاث الضوء منها، هو أمر مستحيل تماماً. فلا شيء يسبق الفوتونات.

وهنا تكمن المشكلة. ففي نظرية نيوتن للجاذبية يمارس الجسم شد الجاذبية على جسم آخر بشدة تتحدد فقط بكتلة الجسمين المعنيين ومقدار المسافة التي تفصلهما. ولا تعتمد الشدة على طول فترة بقاء الجسمين منجذبين. ويعني ذلك أنه إذا تغيرت كتلتاهما أو المسافة التي تفصلهما فإن الجسمين سيشعران بالتغير في شد الجاذبية المتبادل بينهما لحظياً تبعاً لنيوتن. فمثلاً تزعم نظرية نيوتن للجاذبية أنه لو انفجرت الشمس فجأة، فإن الأرض - على بعد 93 مليون ميل تقريباً - ستبتعد لحظياً من مدارها البيضاوي المعتاد. ومع أن ضوء الانفجار يستغرق ثماني دقائق لينتقل من الشمس إلى الأرض، إلا أنه تبعاً لنظرية نيوتن فإن معلومة انفجار الشمس ستصل لحظياً إلى الأرض من خلال التغير المفاجئ في قوى الجاذبية المتحكمة في حركتها.

وهذا الاستنتاج في تناقض مباشر مع النسبية الخاصة حيث إن الأخيرة تؤكد أنه لا يمكن أن تنتقل أية معلومات أسرع من الضوء - والانتقال اللحظي يشكل اعتداء على هذا المبدأ في أعلى صورة.

ولهذا، ففي الجزء المبكر من القرن العشرين، أيقن آينشتاين بأن نظرية الجاذبية الناجحة جداً لنيوتن تتعارض مع نظريته في النسبية الخاصة. ولوثوق آينشتاين من صحة النسبية الخاصة، وعلى الرغم من تلال الدعم التجريبي لنظرية نيوتن، فإنه فكر في نظرية جديدة للجاذبية تتوافق مع النسبية الخاصة. وقد أدى ذلك به في النهاية إلى اكتشاف النسبية العامة، التي خضعت فيها خواص المكان والزمان لتحولات ملحوظة مرة أخرى.

ثالثاً: أكثر أفكار آينشتاين إشراقاً

وحتى قبل اكتشاف النسبية الخاصة فإن نظرية نيوتن للجاذبية كانت تفتقر إلى أمر هام. فعلى الرغم من أنها يمكن أن تستخدم لإجراء تنبؤات عالية الدقة حول الكيفية التي تتحرك بها الأجسام تحت تأثير الجاذبية، إلا أنها لا تقدم نظرة ثاقبة عن معنى الجاذبية. بمعنى أنه كيف يحدث أن جسمين منفصلين فيزيائياً أحدهما عن الآخر، ربما لبضع مئات الملايين من الأميال أو أكثر، يؤثران الواحد في حركة الآخر؟ ما هي الوسائل التي تنجز بها الجاذبية رسالتها؟ وهذه مشكلة كان نيوتن نفسه على دراية بها، فقد كتب يقول:

> الأمر الذي لا يمكن تصوره هو أن تقوم مادة جامدة غير حية من دون وساطة من أي شيء آخر ليس مادياً بالتأثير في مادة أخرى من دون اتصال متبادل. وهذه الجاذبية أمر فطري ومتأصل وأساسي في المادة لدرجة أن أحد الأجسام يؤثر في جسم آخر خلال الفراغ من دون تدخل من أي شيء آخر يمكن بواسطته أو خلاله انتقال فعلهما وقوتهما من واحد إلى الآخر، الأمر المنافي للعقل بالنسبة لي لدرجة أنني واثق ألا أحد له كامل القوة الفكرية في الأمور الفلسفية سيقع في هذا. ولابد للجاذبية من عامل مسبب يؤثر باستمرار وفقا لقوانين معينة، لكن سواء كان هذا العامل ماديا أو غير مادي، فقد تركت هذا لعناية قرائي[1].

ويعني ذلك أن نيوتن قد تقبل وجود الجاذبية وطور معادلات تصف تأثيراتها

---

(1) Isaac Newton, *Sir Isaac Newton's Mathematical Principles of Natural Philosophy and His System of The World,* 2 vols., translated by A. Motte and Florian Cajori (Berkley, CA: University of California Press, 1962), vol. 1, p. 634.

بدقة، لكنه لم يقدم أبداً أية نظرة ثاقبة في كيفية عملها بالفعل. وقد أعطى العالم "كتيب التشغيل" للجاذبية ورسم الخطوط الرئيسية لكيفية استخدامها - التعليمات التي استغلها الفيزيائيون والفلكيون والمهندسون بنجاح لرسم مسارات الصواريخ إلى القمر والمريخ والكواكب الأخرى في المجموعة الشمسية، وللتنبؤ بالخسوف والكسوف، وللتنبؤ بحركة المذنبات، وهكذا. غير أنه ترك الأمور الداخلية - محتويات "الصندوق الأسود" للجاذبية - في غموض تام. وعندما تستخدم جهاز الأقراص المدمجة (CD) أو الحاسب الشخصي، فقد تجد نفسك في نفس الحالة من عدم المعرفة في ما يتعلق بكيفية عملها من الداخل. وطالما كنت تعرف كيف تستخدم الآلة فلا أنت ولا أي شخص يحتاج إلى أن يعرف كيف تنجز هذه الآلة المهام التي تريدها منها. لكن إذا تعطل جهاز الأقراص المدمجة أو الحاسب الشخصي فإن إصلاحه يعتمد كلية على معرفة كيفية عمله من الداخل. وبالمثل، أيقن آينشتاين أنه على الرغم من مئات السنين من التأكيدات التجريبية لنظرية نيوتن، إلا أن النسبية الخاصة تعني بشكل دقيق أن نظرية نيوتن قد "انكسرت"، وأن إصلاحها يتطلب الإمساك بتلابيب التساؤل عن حقيقة الجاذبية وطبيعتها الكلية.

وفي العام 1907، وبينما كان آينشتاين مستغرقاً في التفكير في هذه المواضيع وهو جالس في مكتب تسجيل الاختراعات في مدينة برن بسويسرا، توصل إلى فكرة أساسية من خلال نوبات متقطعة أوصلته في النهاية إلى نظرية جديدة جذرياً للجاذبية - وهي مدخل لن يملأ ببساطة الفراغ في نظرية نيوتن، لكنه بالأحرى سيعيد صياغة فكرة الجاذبية بالكامل، وأهم ما في الموضوع أنها ستكون على وفاق تام مع النسبية الخاصة.

والنظرة الثاقبة لآينشتاين مناسبة للسؤال الذي يمكن أن يكون قد شغلك في الفصل الثاني. وقد ركزنا في ذلك الفصل على أننا مهتمون بفهم كيف يظهر العالم للأفراد الذين يتحركون بسرعة نسبية ثابتة. وإذا قارنا بعناية مشاهدات هؤلاء الأفراد سنجد بعض الدلالات المثيرة حول طبيعة المكان والزمان. لكن ماذا عن الأفراد الذين يتحركون حركة متسارعة؟ ستكون مشاهدات مثل هؤلاء الأفراد أكثر تعقيداً عند تحليلها من تلك المشاهدات الخاصة بالأفراد الذين يتحركون بسرعة ثابتة، والذين تتسم حركتهم بأنها أكثر هدوءاً، لكن مع ذلك يمكن أن نتساءل عما إذا كان هناك بعض الوسائل لترويض هذا التعقيد ووضع الحركة المتسارعة مباشرة في الإطار المكتشف حديثاً للمكان والزمان.

وقد بيّن "فكر آينشتاين الأكثر توفيقاً" كيف نفعل ذلك. وحتى تفهم أفكار

آينشتاين تخيل أنك في عام 2050 وأنك تعمل رئيساً لخبراء المفرقعات في مكتب التحقيقات الفيدرالي (FBI)، وقد تلقيت لتوك مكالمة من شخص منزعج لفحص ما يبدو أنه قنبلة متقدمة الصنع مزروعة في قلب العاصمة واشنطن. وبعد اندفاعك إلى الموقع واختبار القنبلة أصبح الكابوس الرهيب حقيقة: كانت القنبلة نووية ومن القوة بحيث أنها حتى لو دفنت عميقاً في القشرة الأرضية أو ألقيت في أعماق المحيط فإن التدمير الناتج عن انفجارها سيكون مهلكاً. وبعد دراسة آلية تفجير القنبلة بحرص شديد أيقنت أنه لا أمل هناك في فكها، بل أكثر من ذلك سترى أنها مزودة بشرك عبثي. والقنبلة معلقة في ميزان بحيث تنفجر إذا انحرفت قراءة الميزان بمقدار 50٪ عن القراءة الحالية. وتبعاً لجهاز التوقيت فليس أمامك إلا أسبوع واحد لتبدأ في العد التنازلي للانفجار. وعلى عاتقك يقع مصير ملايين الناس - فما الذي تفعله؟

حسناً، بما أنه لا يوجد موقع آمن في أي مكان فوق أو تحت الأرض لتفجير القنبلة، فيبدو أنه ليس أمامك سوى خيار واحد: لابد من رفع القنبلة إلى أعماق الفضاء الخارجي، حيث لا يسبب انفجارها أي دمار. وقمت بطرح هذه الفكرة في اجتماع لفريقك في مكتب التحقيقات الفيدرالي، لكن سرعان ما تم تسفيه خطتك من قبل أحد المساعدين الشبان. بدأ مساعدك واسمه اسحق بالقول: "هناك مشكلة خطيرة في خطتك، فكلما انطلقت القنبلة مبتعدة عن الأرض سيقل وزنها، حيث أن شد الجاذبية بينها وبين الأرض سيقل. ويعني ذلك أن قراءة الميزان داخل منظومة القنبلة ستقل مسببة الانفجار قبل الوصول إلى مكان آمن في أعماق الفضاء. وقبل أن يتاح لك الوقت الكافي لاستيعاب هذا النقد تماماً، انطلق مساعد شاب آخر اسمه ألبرت قائلا: "في الحقيقة عليك أن تفكر ملياً، لأن هناك مشكلة أخرى، وهي في نفس أهمية اعتراض إسحق لكنها أكثر دقة، لذا تحملوني وأنا أشرحها"، ولأنك في حاجة إلى لحظة للتفكير في اعتراضات إسحق، فقد حاولت إسكات ألبرت، ولكن كالعادة، عندما يبدأ في الكلام لا توجد طريقة لإسكاته.

"لإرسال القنبلة إلى الفضاء الخارجي، لابد من تركيبها فوق صاروخ. وعندما يتسارع الصاروخ إلى أعلى لاختراق الفضاء ، فإن القراءة على مقياس الميزان ستزيد، وستؤدي بالتالي إلى حدوث الانفجار قبل الأوان. وسترى أن قاعدة القنبلة - المستقرة على الميزان - ستزيد من ضغطها على المقياس أكثر منها في حالة السكون، تماماً كما ينضغط جسمك إلى الخلف فوق مقعد السيارة المتسارعة. وستضغط القنبلة على المقياس كما يضغط ظهرك على وسائد مقعد السيارة. وعندما ينضغط مقياس الميزان ستزيد قراءته - سيؤدي هذا إلى انفجار

القنبلة إذا كانت الزيادة الناتجة أكثر من 50٪".

لقد شكرت ألبرت على تعليقه لكن حيث أنك قد استبعدت تفسيره لتؤكد ذهنياً على ملاحظات إسحق، فإنك ستعلن مكتئباً أن قتل فكرة ما قد لا يحتاج سوى إلى ضربة واحدة قاتلة، وفي ما يبدو فقد فعلت ملاحظة إسحق الصحيحة ذلك بالتأكيد. ولأنك شعرت ألاً أمل هناك إلى حد ما، فقد سألت الحضور أن يأتوا بمقترحات جديدة. وفي هذه اللحظة، جاء ألبرت بشرح كاسح: "عند إعادة التفكير، لا أعتقد أن فكرتك ليست قابلة للتنفيذ على الإطلاق. وملاحظة إسحق أن الجاذبية تقل كلما صعد جهاز القنبلة في الفضاء يعني أن القراءة على مقياس الميزان ستنخفض. وملاحظتي حول أن تسارع الصاروخ إلى أعلى سيتسبب في أن جهاز القنبلة سيضغط أكثر على المقياس، مما يعني أن القراءة ستزداد. وبأخذ الملاحظتين معاً، يعني أننا لو تحكمنا بعناية في تسارع الصاروخ لحظة بلحظة أثناء صعوده، فإن هذين المؤثرين يمكن أن يلغيا أحدهما الآخر"! وفي المراحل الأولى لصعود الصاروخ، وتحديداً عندما تكون قوى الجاذبية الأرضية كاملة، فإن الصاروخ لن يتسارع بشدة، وستظل قراءة المقياس في حدود الـ 50٪ المسموح بها. وكلما ارتفع الصاروخ مبتعداً عن الأرض - ويصبح تأثير جاذبية الأرض أقل فأقل - فإننا سنحتاج إلى زيادة التسارع إلى أعلى لإحداث التوازن. ويمكن للزيادة في القراءة الناتجة عن التسارع إلى أعلى أن تتساوى تماماً مع النقص في القراءة الناتج عن تناقص شدة الجاذبية، وبذا فإننا في الحقيقة نستطيع أن نحافظ تماماً على القراءة الفعلية على المقياس من التغير".

وبدأ اقتراح ألبرت يتخذ شكلاً معقولاً. ولقد أجبت بأن "التسارع إلى أعلى يمكن أن يؤدي إلى تعويض النقص في الجاذبية، ومن الممكن محاكاة تأثير الجاذبية من خلال حركة تسارعية مناسبة".

"بالضبط!" أجاب ألبرت.

وتسترسل أنت: "وهكذا يمكن أن نرفع القنبلة إلى الفراغ مع تنظيم تسارع الصاروخ بحكمة، وبذا يمكن أن نتأكد من عدم تغير قراءة المقياس، وبذلك نتجنب انفجارها إلى أن تصل إلى مسافة آمنة من الأرض". وهكذا، وبواسطة المناورة بين الجاذبية والحركة المتسارعة - وباستخدام دقة علم الصواريخ في القرن الواحد والعشرين - من الممكن تجنب الكارثة.

كان الإقرار بحقيقة أن الجاذبية والحركة المتسارعة متشابكتان بشدة هو مفتاح النظرة الثاقبة لآينشتاين في يوم سعيد أثناء وجوده في مكتب تسجيل الاختراعات في برن. وبالرغم من خبرتنا مع القنبلة التي أضاءت جوهر أفكاره، إلا أن الأمر

يستحق إعادة صياغة في إطار أقرب إلى ما جاء في الفصل الثاني. ولهذا الغرض، أسترجع حالتك لو كنت في غرفة بلا نوافذ محكمة الغلق لا تتسارع، فلن يكون لديك أي وسيلة لتعيين سرعتك. ستبدو الغرفة دون أي تغير، وأي تجارب ستجريها ستعطي نفس النتائج من دون اعتبار لسرعة حركتك (حركة الغرفة). ومن حيث المبدأ، فإنك بدون علامات خارجية للمقارنة لا يمكنك أن تصف حالة حركتك بسرعة معينة. ومن جهة أخرى، إذا كنت تتسارع، وحتى في ظروف منظورك المحدود والمحبوس داخل الغرفة المحكمة الغلق، فإنك ستشعر بضغط على جسمك. فمثلاً، إذا كان مقعدك المتجه إلى الأمام مثبتاً على الأرض، وكانت الحجرة محكمة الغلق تتسارع إلى الأمام، فإنك ستشعر بضغط المقعد على ظهرك تماماً كما وصف ألبرت حالة السيارة. وبنفس الطريقة إذا تسارعت الغرفة إلى أعلى فستشعر بضغط الأرض على قدميك. كان يقين آينشتاين أنه داخل الغرفة الصغيرة المحكمة الغلق، لن تستطيع أن تميز حالة التسارع عن حالات عدم التسارع إلا بواسطة الجاذبية: وعندما يتم ضبط هذين المقدارين بحكمة فإنك لا يمكن أن تميز القوة التي تستشعرها: هل هي من الجاذبية أم من التسارع؟ وإذا كانت غرفتك مستقرة رأسياً في سكينة فوق سطح الأرض، فإنك ستشعر بالقوة المألوفة على قدميك، تماماً كما في سيناريو التسارع إلى أعلى، وهو بالضبط ما استخدمه ألبرت في الحل الذي اقترحه لرفع القنبلة إلى الفراغ. أما إذا كانت غرفتك مستقرة بظهرها على الأرض، فستشعر بضغط المقعد على ظهرك (يمنعك من السقوط) تماماً مثل تسارعك أفقياً. وقد أطلق آينشتاين على عدم المقدرة على التمييز بين الحركة المتسارعة والجاذبية "مبدأ التكافؤ" (The Equivalence Principle). وهو يلعب دوراً محورياً في النسبية العامة[2].

(2) وبدقة أكثر بعض الشيء، أيقن آينشتاين أن مبدأ التكافؤ يصلح طالما كانت مشاهداتنا محصورة في مناطق صغيرة من الفضاء - أي كلما كانت "الغرفة" صغيرة بما فيه الكفاية. والسبب هو أن مجالات الجاذبية يمكن أن تختلف في شدتها (وفي اتجاهها) من مكان لآخر. لكننا نتصور أن الغرفة تتسارع كواحدة واحدة وبالتالي فإن تسارعك يولد مجال قوى جاذبية مفرداً ومتجانساً. وبالنقص المطرد في حجم الغرفة سيقل باطراد المكان المسموح به لتغير الجاذبية، وبالتالي فإن مبدأ التكافؤ سيصبح أكثر قابلية للتطبيق. أما الفرق بين مجال الجاذبية المتجانس الناتج عن تسارع نقطة مميزة ومجال جاذبية "حقيقي" من المحتمل أن يكون غير متجانس تولّد عن جاذبية "المد والجزر" (حيث أنه مسؤول عن تأثير جاذبية القمر عن المد والجزر على الأرض). ويمكن إيجاز الملاحظة الحالية بالقول إن مجال جاذبية المد والجزر يصبح أقل تأثيراً كلما صغر حجم الغرفة، الأمر الذي يؤدي إلى أن يصبح الفرق بين الحركة المتسارعة ومجال الجاذبية الحقيقي غير محسوس.

ويظهر هذا الوصف أن النسبية العامة قد أنهت عملاً بدأته النسبية الخاصة. فمن خلال مبدأ النسبية، تعلن نظرية النسبية الخاصة: تبدو قوانين الفيزياء واحدة بالنسبة لجميع المشاهدين الموجودين في حالة حركة ثابتة السرعة. لكن هذه الديمقراطية في الحقيقة محدودة، فهي تستبعد عدداً هائلاً من وجهات النظر الأخرى - وهم الأفراد الذين يتحركون بتسارع. وتبين لنا أفكار آينشتاين عام 1907 كيف نُضَمِّن كل وجهات النظر - ذات السرعة الثابتة والمتسارعة - داخل إطار واحد متكافئ. وحيث أنه لا فرق بين أفضلية متسارعة بدون حقل جاذبية وأفضلية غير متسارعة في حقل جاذبية، فإننا يمكن أن نستخدم المنظور الأخير لنعلن أن (جميع المشاهدين، بصرف النظر عن حالة حركتهم، يمكن أن يزعموا أنهم في حالة سكون، وأن "بقية العالم هي التي تتحرك من حولهم") طالما أنهم يضمنون مجالاً مناسباً للجاذبية في وصفهم لما يحيط بهم". وفي هذا المعنى، ومن خلال احتواء الجاذبية، فإن النسبية العامة تؤكد أن كل نقط أفضلية المشاهدين المحتملة تقف على قدم المساواة. (وكما سنرى لاحقاً، فإن هذا يعني أن التمييز بين المشاهدين في الفصل الثاني، التي اعتمدت على الحركة المتسارعة - كما الحال عندما تعقب جورج غريس بإطلاق محركه النفاث، وشاخ بمعدل أبطأ منها - تسمح بوصف متكافئ من دون تسارع، ولكن مع جاذبية).

وبالتأكيد، فإن هذا الارتباط الوثيق بين الجاذبية والحركة المتسارعة هو إنجاز مشهود، لكن لماذا جعل ذلك من آينشتاين سعيداً لهذه الدرجة؟ السبب ببساطة هو أن الجاذبية شيء غامض. إنها قوة عظمى تتغلغل في حياة الكون، غير أنها مراوغة وغير مادية. ومن ناحية أخرى فإن الحركة المتسارعة، على الرغم من كونها أكثر تعقيداً بشكل ما من الحركة بسرعة ثابتة، فهي متماسكة ومحسوسة. وباكتشاف رابطة أساسية بين الاثنتين، فإن آينشتاين أيقن أنه يمكن استخدام فهمه للحركة كأداة قوية ليكتسب فهماً مماثلاً للجاذبية. ولم يكن اختبار هذه الاستراتيجية عملياً أمراً سهلاً حتى بالنسبة لعبقرية آينشتاين، لكن في النهاية حمل هذا المدخل ثمار النسبية العامة. وقد تطلب الوصول إلى هذه النهاية أن يصوغ آينشتاين حلقة ثانية في السلسلة التي توحد بين الجاذبية والحركة المتسارعة: انحناء المكان والزمان الذي سنعرض له الآن.

رابعاً: التسارع واعوجاج المكان والزمان

عمل آينشتاين على حل مشكلة فهم الجاذبية التي تسلطت عليه بشكل مكثف. وقد كتب للفيزيائي آرنولد سومرفيلد (Arnold Sommerfeld) بعد مرور

خمس سنوات على الكشف العظيم الذي حدث أثناء وجوده في مكتب براءات الاختراع في برن: "إنني متفرغ الآن للعمل على حل مشكلة الجاذبية... هناك أمر واحد مؤكد - هو أنني لم أتعذب في حياتي بشيء مثل هذا أبداً .. وبالمقارنة بهذه المشكلة فإن نظرية النسبية الأصلية [الخاصة] تعتبر لعب أطفال"(3).

ويبدو أن آينشتاين قد وضع يده على مفتاح الاكتشاف الخطير التالي، وهو ما تبع تطبيق النسبية الخاصة بسهولة - لكن بدقة - على الحلقة التي تربط الجاذبية بالحركة المتسارعة سنة 1912. ولفهم تلك الخطوة في منطق آينشتاين، من الأسهل أن نركز - كما فعل هو كما يبدو - على مثال ما محدد للحركة المتسارعة(4). ولنتذكر مرة أخرى أن الجسم يتسارع إذا تغيرت سرعته أو اتجاه حركته. وللتبسيط سنركز على الحركة المتسارعة التي يتغير فيها اتجاه حركة الجسم بينما تظل سرعته ثابتة. وبالتحديد سنأخذ في الاعتبار الحركة في مسار دائري مثل الحركة التي يمارسها الشخص في لعبة التورنادو في إحدى حدائق الملاهي. فإذا لم تكن قد قمت بتجربة ثبات وضعك أثناء ركوبك هذه اللعبة، فإنك ستقف بظهرك مستنداً إلى الحائط الداخلي لبناء دائري من الزجاج العضوي الذي يدور بسرعات عالية. ومثل كل الحركات المتسارعة فإنك ستشعر بهذه الحركة - وستشعر بأن جسمك مدفوع ناحية الخارج من المركز على امتداد قطر الدائرة، كما ستشعر بضغط حاجز الزجاج على ظهرك ليحتفظ بك في حركة دائرية. (وفي الحقيقة، وعلى الرغم من أن ذلك لا علاقة له بموضوع مناقشتنا الحالية، فإن الحركة المغزلية "تثبِّت" جسمك إلى الحائط الزجاجي بقوة لدرجة أنه عندما تبتعد السقالة التي تقف عليها فإنك لا تنزلق إلى أسفل). فإذا كانت الحركة أثناء اللعبة ناعمة جداً وأغلقت عينيك فإن ضغط الحركة على ظهرك - مثل الدعم الذي يقدمه السرير - يمكن أن يجعلك تشعر غالباً بأنك راقد. وتأتي كلمة "غالباً" من حقيقة أنك ما زلت تشعر بالجاذبية الرأسية العادية، بحيث لا يمكن استغفال مخك تماماً. أما إذا كنت تركب التورنادو في الفضاء المكان الخارجي، وإذا كان سيدور بالمعدل الصحيح، فإن الأمر سيكون كما تشعر تماماً برقادك على سرير ساكن على الأرض. والأكثر من ذلك أنك عندما "تنهض وتسير على الناحية الداخلية للزجاج

(3) ألبرت آينشتاين، كما هو مأخوذ من كتاب: Albrecht Folsing, *Albert Einstein: A Biography* = *Albert Einstein: Eine Biography,* translated from the German by Ewald Osers (NewYork; London: Viking, 1997), p. 315.

(4) John Stachel, "Einstein and the Rigidly Rotating Disk." in: A. Held, ed., *General Relativity and Gravitation: One Hundred Years after the Birth of Albert Einstein,* 2 vols. (NewYork: Plenum, 1980), p. 1.

الذي يدور فإن قدميك ستضغطان عليها تماماً كما تفعل قدماك على الأرض. وفي الحقيقة فإن محطات الفضاء المكان يتم تصميمها لتدور بهذا الشكل لتوجد شعوراً مصطنعاً بالجاذبية في الفضاء الخارجي.

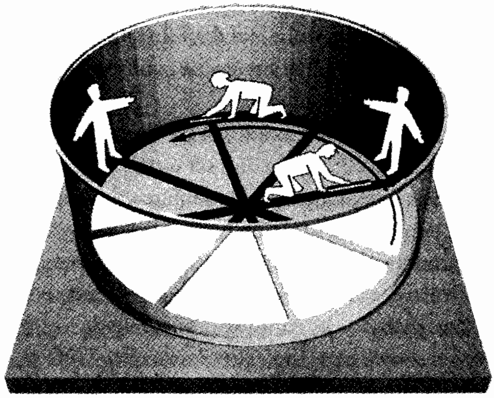
وحيث أننا قد استخدمنا الحركة المتسارعة للعبة التورنادو المغزلية لمحاكاة الجاذبية، فإننا يمكن أن نتتبع آينشتاين ونصف كيف يبدو المكان والزمان لشخص من داخل لعبة التورنادو المغزلية. كان التعليل في ما يخص هذا الموقف كما يلي: يمكننا نحن المشاهدين الساكنين بسهولة أن نقيس محيط ونصف قطر التورنادو المغزلي. فمثلاً، لقياس المحيط يمكن أن نستخدم مسطرة تقلب طولياً على طول الممشى الذي يقف عليه اللاعبون. وبالنسبة لنصف القطر فمن الممكن استخدام نفس الطريقة بادئين من المركز ومنتهين عند الحافة الخارجية. وكما نتوقع من معلوماتنا عن الهندسة بالمرحلة الثانوية، فإننا سنجد أن النسبة بينهما هي ضعف العدد π (ط) - حوالي 28.6 - تماماً كما هي في أية دائرة مرسومة على صفحة مستوية. لكن، كيف يبدو الأمر من منظور شخص ما موجود داخل اللعبة؟

وللإجابة عن ذلك سنطلب من سليم وجيم، اللذين يستمتعان بركوب لعبة التورنادو في الوقت الحالي... أن يقوما ببعض القياسات. سنلقي بمسطرة إلى سليم الذي يتأهب لقياس المحيط، وسنلقي بأخرى لجيم ليقيس نصف القطر. وللحصول على أفضل منظور سنطل على اللعبة من أعلى كما هو مبين في الشكل رقم (3-1). وقد زودنا هذه اللقطة بسهم يشير إلى اتجاه الحركة اللحظي عند كل نقطة. وعندما يبدأ سليم في قياس المحيط سنرى في هذه اللحظة من أعلى أنه سيحصل على قراءة مختلفة عما حصلنا عليه. فعندما يضع سليم المسطرة على المحيط سنلاحظ أن "طول المسطرة قد نقص". وما هذا إلا تقلص لورنس الذي ناقشناه في الفصل الثاني، والذي ينص على أن طول الجسم يبدو أقصر في اتجاه حركته. وتعني المسطرة الأقصر أنها ستتطلب طولياً عدداً "أكبر" من المرات لتغطي المحيط كله. وحيث إن سليم ما زال يعتقد بأن طول مسطرته قدم واحد (بما أنه لا توجد حركة نسبية بين سليم ومسطرته فإنه يراها بطولها المعتاد ومقداره قدم واحد)، فإن ذلك يعني أن سليم سيقيس محيطاً "أطول" مما قسناه. (إذا بدا ذلك متناقضاً، يمكن أن يكون الهامش النهائي رقم (5) مساعداً).

وماذا عن نصف القطر؟ يستخدم جيم نفس الطريقة - طريقة تقليب المسطرة - لإيجاد طول دعامة نصف القطر. ومن ارتفاعنا سنرى أنه سيحصل على نفس النتيجة التي حصلنا عليها. وسبب ذلك أن المسطرة ليست موضوعة في الاتجاه اللحظي لحركة اللعبة (كما هو الحال أثناء قياس المحيط) وبدلاً من ذلك

فإنها تشير بزاوية 90 درجة على اتجاه الحركة، وبذلك فإنها لا تتقلص طولياً. وبذا فسيجد جيم نفس طول نصف القطر الذي وجدناه.

الشكل رقم (3-1)



تتقلص مسطرة سليم لأنها موضوعة على طول اتجاه حركة اللعبة. بينما تقع مسطرة جيم على طول دعامة نصف القطر عمودية على اتجاه حركة اللعبة، ولذا فإن طولها لا يتقلص.

والآن عندما يقوم سليم وجيم بحساب نسبة المحيط إلى نصف القطر فقد يجدانها أكبر مما حصلنا عليه، أي أكبر من ضعف قيمة π (ط)، حيث إن المحيط قد أصبح أطول بينما ظل نصف القطر كما هو. وهذا أمر غريب. فكيف يمكن في هذا العالم لأي شيء له شكل دائرة أن ينتهك المعتقد الإغريقي الذي يقول بأن هذه النسبة هي بالضبط ضعف قيمة π (ط)؟

وفي ما يلي تفسير آينشتاين لذلك. والنتيجة الإغريقية القديمة صحيحة بالنسبة للدوائر المرسومة على سطح مستو. وتماماً كما في حالة المرايا غير المستوية (محدبة ومقعرة أو معوجة) في حديقة الملاهي التي تشوّه الأبعاد المكانية المعتادة لصورتك، فإن الدائرة المرسومة على سطح غير مستوٍ (معوج أو مقعر أو محدب) ستكون نسبها المكانية مشوهة كذلك: ولن تصبح نسبة المحيط إلى نصف القطر ضعف قيمة π (ط).

وعلى سبيل المثال، يقارن الشكل رقم (3-2) بين ثلاث دوائر لها نفس نصف القطر. لكنك ستلاحظ أن محيطاتها ليست متساوية. فمحيط الدائرة (ب) المرسومة على سطح كرة أقل من محيط الدائرة المرسومة على سطح مستو (أ)،

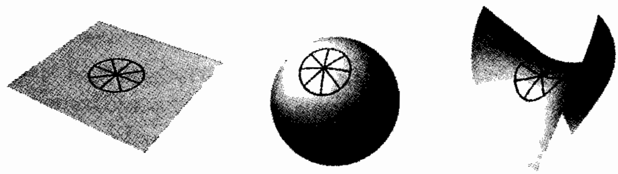
على الرغم من أن لهما نفس سمات نصف القطر. وتؤدي طبيعة سطح الكرة المنحني إلى بعض من التقارب بين خطوط أنصاف قطر الدائرة، الأمر الذي يؤدي بدوره إلى نقص طفيف في محيط الدائرة. ومرة أخرى، فإن محيط الدائرة (ج) المرسومة على سطح منحنٍ - على شكل سرج - سيكون أكبر من ذلك المرسوم على سطح مستو؛ فطبيعة انحناء سطح السرج تتسبب في أن خطوط نصف القطر ستمتد إلى الخارج متباعدة بعضها عن بعض قليلاً، الأمر الذي يؤدي بدوره إلى زيادة طفيفة في محيط الدائرة. وتعني هذه الملاحظات أن النسبة بين المحيط ونصف القطر في (ب) أقل من 2π (2ط). بينما في (ج) فإن النسبة ستكون أكبر من 2π (2ط) وخاصة القيمة الأكبر في حالة (ج) وهو بالضبط ما وجدناه في لعبة التورنادو المغزلية. وقد أدى ذلك بآينشتاين لطرح فكرة - تحدب المكان - كتفسير لانتهاك الهندسة الإقليدية "المعتادة". فالهندسة المستوية الإغريقية التي تعلمها التلاميذ لآلاف السنين لا تنطبق ببساطة على شخص يلعب لعبة التورنادو المغزلية. وبالأحرى فإن التعميم حول تحدب المكان كما في (ج) في الشكل رقم (3-2)

---

(5) إن تحليل لعبة التورنادو، أو كما يطلق عليها في لغة أكثر تقنية "القرص الجامد الدوار"، يؤدي بسهولة إلى بعض اللبس. وفي الحقيقة، وحتى يومنا هذا لا يوجد إجماع عالمي على عدد معقول من سمات هذا المثال. وقد اتبعنا روح تحليل آينشتاين نفسه في المتن، وفي هذا الهامش نواصل اتخاذ جانب وجهة نظره ونحاول أن نوضح بعض الخواص التي قد نجد أنها تسبب الالتباس. أولاً، قد تسبب لك عدم انكماش محيط اللعبة بنفس الطريقة التي تنكمش بها المسطرة ببعض الحيرة، وبالتالي عند قياس المحيط بواسطة سليم لن يجد أنه نفس القيمة التي وجدناها في الأصل. وإذا أخذنا في اعتبارنا أننا طوال المناقشة كانت اللعبة تدور باستمرار، ولم نقم بتحليل هذه اللعبة أثناء توقفها، وهكذا من منظورنا كمشاهدين ساكنين، فالاختلاف الوحيد بين قياساتنا وقياسات سليم لمحيط اللعبة أن مسطرة سليم قد طرأ عليها انكماش لورنس، وكانت لعبة التورنادو تدور عندما قمنا بقياساتنا، وكانت كذلك تدور عندما راقبنا سليم يجري نفس القياسات. وحيث أننا نرى انكماش مسطرته، فإننا نتحقق من أنه علينا وضع المسطرة مرات أكثر لنغطي طول المحيط كله، وبذلك نقيس مسافة أطول، وسيكون انكماش لورنس لمحيط اللعبة شيئاً مناسباً فقط إذا قارنا خواص اللعبة في حالتي الدوران والسكون، غير أننا لا نحتاج إلى هذه المقارنة.

ثانياً، وبالرغم من حقيقة عدم حاجتنا لتحليل اللعبة وهي في حالة السكون، فإننا قد نتساءل حول ماذا يحدث عندما تتباطأ ثم تقف. والآن قد يبدو أن علينا أن نأخذ في اعتبارنا تغير المحيط مع تغير السرعة الناتج من الدرجات المختلفة لانكماشات لورنز. لكن كيف يمكن أن يتمشى هذا مع نصف قطر لا يتغير؟ وهذه مشكلة دقيقة يتوقف حلها على حقيقة أنه لا يوجد جسم "جامد تماماً" في دنيا الواقع. فيمكن للأجسام أن تتمدد وتلتوي وبالتالي تستوعب التمدد والانكماش اللذين تمر بهما، فإذا لم يكن هذا صحيحاً، كما ذكر آينشتاين، فإن القرص الدوار، الذي تكوّن في الأصل بأن تركنا قطعة من الفلز المنصهر تدور لتبرد أثناء حركتها، سيتحطم إذا تغير معدل دورانه بالتالي. وللحصول على تفاصيل أكثر عن تاريخ القرص الجامد الدوار، انظر: المصدر نفسه.

سيحل محل الهندسة المستوية[5].



الشكل رقم (3–2)

دائرة مرسومة على سطح كرة (ب) محيطها أقصر من المحيط المرسوم على صفحة مستوية (أ)، بينما للدائرة المرسومة على سطح سرج (ج) محيط أطول، بالرغم من أن للثلاثة نفس نصف القطر.

وهكذا تحقق آينشتاين من أن العلاقات الهندسية المكانية المألوفة والتي صاغها الإغريق وتخص الأشكال المكانية "المستوية" مثل دائرة على سطح منضدة مستوٍ، لا تنطبق من منظور مشاهد متسارع. وقد ناقشنا نوعاً خاصاً واحداً من الحركة المتسارعة، لكن آينشتاين قد أوضح أن هناك نتائج مماثلة - تحدب المكان - تصلح في كل حالات الحركة المتسارعة.

وفي الحقيقة لا تؤدي الحركة المتسارعة إلى اعوجاج المكان فقط، بل إنها تؤدي كذلك إلى اعوجاج مشابه للزمان. (وتاريخياً ركز آينشتاين اهتمامه أولاً على اعوجاج الزمان، ثم أيقن بعد ذلك بأهمية اعوجاج المكان[6]). ولا يجب أن يكون تأثير الزمان مفاجأة بشكل خاص حيث أننا قد رأينا في الفصل الثاني أن النسبية الخاصة تربط بين المكان والزمان في وحدة واحدة. وقد لخص مينكوفسكي هذا الاندماج في كلمات شعرية قالها سنة 1908، أثناء محاضرة له عن النسبية الخاصة: "وهكذا فإن الزمان بمفرده والمكان بمفرده سيتحولان إلى مجرد ظلال، ولن يحفظ استقلالهما إلا نوع من الاتحاد بين الاثنين"[7]. وفي لغة أبسط لكنها بالمثل غير دقيقة، وبنسج المكان والزمان معاً في البنية المتجانسة للزمكان، تنص النسبية الخاصة على "ما هو صحيح بالنسبة للمكان صحيح للزمان". لكن

---

(6) سيرى القارئ ذو الخبرة، في مثال لعبة التورنادو، أنه في حالة الإطار المرجعي الذي يدور بانتظام، فإن المقاطع الفضائية ذات الأبعاد الثلاثة المحدبة، والتي ركزنا عليها ستتداخل بعضها مع بعض في زمكان رباعي الأبعاد، سيتلاشى تحدبه.

(7) هيرمان مينكوفسكي، مقتبس من: Folsing, *Albert Einstein: A Biography*, p. 189.

هذا الأمر يثير السؤال: في الوقت الذي يمكننا أن نتخيل المكان المعوج لأن له شكلاً محدباً، فما الذي في الواقع نعنيه بكلمة زمان معوج؟

ولكي نصل إلى الإحساس بالإجابة، لنفرض أنفسنا مرة أخرى على سليم وجيم الموجودين في لعبة التورنادو، ونطلب منهما إجراء التجربة الآتية: يقف سليم بظهره لحائط اللعبة في أحد أطراف دعامات نصف القطر، وسيزحف جيم ببطء في اتجاهه على طول إحدى الدعامات بادئاً من منتصف اللعبة. وسيتوقف جيم عن الزحف بعد كل بضعة أقدام ويقارن الاثنان قراءة الزمن بساعتيهما. فماذا سيجدان؟ من موقعنا الساكن، ومن منظورنا من أعلى يمكن أن نتنبأ بالإجابة: لن تتفق قراءة الساعتين. وسنصل إلى هذه النتيجة لأننا نوقن أن سليم وجيم ينتقلان بسرعتين مختلفتين - في لعبة التورنادو، كلما كنت بعيداً عن مركز دعامة نصف القطر كلما انتقلت مسافة أكبر لتكمل دورة واحدة، ولذلك لابد أن تكون حركتك أسرع. لكن من منطق النسبية الخاصة، كلما زادت سرعتك فإن دقات ساعتك ستتباطأ، وسنوقن أن ساعة سليم ستدق أبطأ من ساعة جيم. وفوق ذلك فإن سليم وجيم سيكتشفان أنه كلما اقترب جيم من سليم فإن معدل دقات ساعة جيم سيتباطأ ليقترب من سرعة دقات ساعة سليم. ويعكس هذا حقيقة أنه كلما ابتعد جيم عن مركز دعامة نصف القطر كلما زادت سرعته الدائرية لتقترب من سرعة سليم.

ونستنتج من ذلك أنه بالنسبة لمشاهد داخل لعبة التورنادو المغزلية مثل سليم وجيم فإن معدل سريان الزمن يعتمد بدقة على موقعيهما - وفي هذه الحالة، يعتمد على بعدهما عن مركز اللعبة. وتفسير ما نعنيه باعوجاج الزمن هو: يكون الزمن معوجاً إذا تغيرت سرعة مروره من موقع إلى آخر. وسيلاحظ جيم كذلك شيئا آخر له أهمية خاصة في مناقشاتنا الحالية كلما زحف على طول دعامة نصف القطر. سيشعر جيم بشد متزايد في اتجاه الخارج، لأنه ليس فقط سرعته هي التي تزيد، بل يتزايد تسارعه كذلك كلما بعد عن مركز اللعبة. وهكذا نجد أنه في لعبة التورنادو يرتبط التسارع الأكبر ببطء الساعات - أي أن التسارع الأكبر يؤدي إلى اعوجاج أكثر وضوحاً في الزمان.

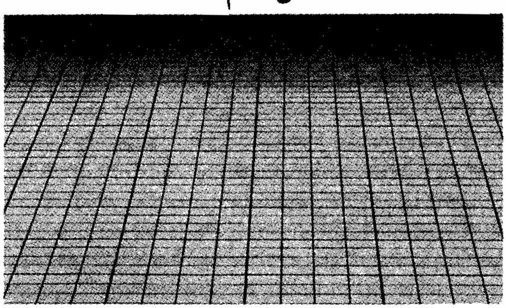
أخذت هذه المشاهدات آينشتاين إلى الوثبة الأخيرة. وحيث أنه قد بين بالفعل أن الجاذبية والحركة المتسارعة لا يمكن التمييز بينهما، وحيث أنه قد بين أن الحركة المتسارعة تترافق مع اعوجاج المكان والزمان، فإنه صاغ الاقتراح التالي حول مكنون "الصندوق الأسود" للجاذبية - الآلية التي تعمل بها الجاذبية. فالجاذبية تبعا لآينشتاين هي اعوجاج المكان والزمان. ولنرَ ما الذي يعنيه ذلك.

خامساً: قواعد النسبية العامة

حتى نستشعر النظرة الجديدة للجاذبية، سنأخذ في اعتبارنا النموذج الأولي لوضع كوكب مثل كوكب الأرض يدور حول نجم مثل الشمس. وتبعاً لجاذبية نيوتن تحتفظ الشمس بالأرض في مدار بمجال للجاذبية غير محدد، يمتد لحظياً عبر مسافات شاسعة في الفراغ ليمسك بكوكب الأرض (وبالمثل يمتد مجال جاذبية الأرض ليمسك بالشمس). ويعطينا آينشتاين مفهوماً جديداً لما يحدث بالفعل. وسيساعدنا ذلك في مناقشتنا لمدخل آينشتاين في الحصول على نموذج صلب محسوس للزمكان يمكن أن نتعامل معه دون عناء. وحتى نقوم بذلك سنبسط الأمور بطريقتين. أولاً، سنهمل الزمان في اللحظة الآنية ونركز كلية على نموذج المكان. وسنعيد تضمين الزمان في مناقشتنا بعد ذلك. ثانياً، ولنتمكن من رسم صور مرئية والمناورة بها على صفحات هذا الكتاب فإننا غالباً ما سنشير إلى نظير ثنائي الأبعاد للمكان ثلاثي الأبعاد. ومعظم ما سنكتسبه من فهم نتيجة التفكير بمدلول النموذج ذي الأبعاد الأقل ينطبق مباشرة على وضع الأبعاد الثلاثة فيزيائياً، وبذا فإن النموذج الأبسط يعطينا وسيلة قوية من الناحية التعليمية.

وقد استخدمنا هذه التبسيطات في الشكل رقم (3-3)، ورسمنا نموذجاً ذا بعدين اثنين لمنطقة فضائية من عالمنا. ويشير التركيب الشبكي إلى وسيلة سهلة لتحديد المواقع تماماً كما تعطي شبكة الشوارع وسيلة لتحديد المواقع في المدينة. وطبعاً في المدينة يستدل على أي عنوان بتحديد موقع شبكة الشوارع ذات البعدين، كما تعطي موقعاً في الاتجاه الرأسي مثل رقم الطابق. إن المعلومة الأخيرة، أي اتجه تحديد الموقع في البعد المكاني الثالث، هي التي يلغيها قياسنا ذو البعدين من أجل وضوح الرؤية.

الشكل رقم (3-3)

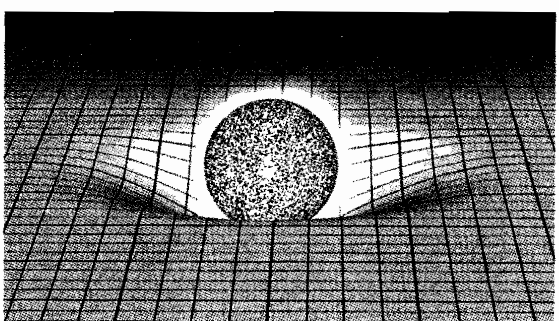


تمثيل تخطيطي لفراغ مستوٍ.

وفي غياب أية مادة أو طاقة، فإن الفراغ كما يراه آينشتاين يكون "مستوياً". وفي النموذج ذي البعدين، فإن هذا يعني أن "شكل" الفراغ لابد أن يشبه سطح منضدة أملس كما هو مرسوم في الشكل رقم (3-3). وهذه هي صورة عالمنا الفضائي التي ظلت مقبولة لآلاف السنين. لكن ما الذي يحدث للفضاء إذا وجد به جسم هائل الكتلة مثل الشمس؟ كان الجواب قبل آينشتاين لا شيء، فالمكان (والزمان) كانا يعدان بمثابة مبنى المسرح الخامل الذي يعد خشبته فقط لتأخذ أحداث العالم مجراها بنفسها عليها. غير أن التسلسل المنطقي لآينشتاين والذي تتبعناه يؤدي بنا إلى نتيجة مختلفة.

يمارس أي جسم ثقيل مثل الشمس، أو أي جسم في الحقيقة، قوة جاذبية على الأجسام الأخرى. وقد تعلمنا من مثال القنبلة الإرهابية أن قوة الجاذبية لا يمكن تمييزها من الحركة التسارعية. أما في مثال لعبة التورنادو، فقد تعلمنا أن التوصيف الرياضي للحركة المتسارعة يتطلب العلاقات الخاصة بالفضاء المكان المحدب. وقد أدت هذه الروابط بين الجاذبية والحركة التسارعية والفضاء المحدب بآينشتاين إلى المقترحات المتميزة بأن وجود كتلة مثل الشمس يتسبب في اعوجاج نسيج الفضاء حولها كما هو موضح بالشكل رقم (3-4). والتشبيه المفيد والذي كثيراً ما نلجأ إليه هو وضع كرة بولينغ فوق غشاء مطاطي في تشبيه لتشوه نسيج الفضاء نتيجة وجود جسم ثقيل مثل الشمس. وتبعاً لهذا الاقتراح الراديكالي فإن الفضاء ليس مجرد مساحة خاملة تمدنا بمسرح لأحداث العالم، بل إن شكل الفضاء يستجيب للأجسام الموجودة في الوسط المحيط.

الشكل رقم (3-4)

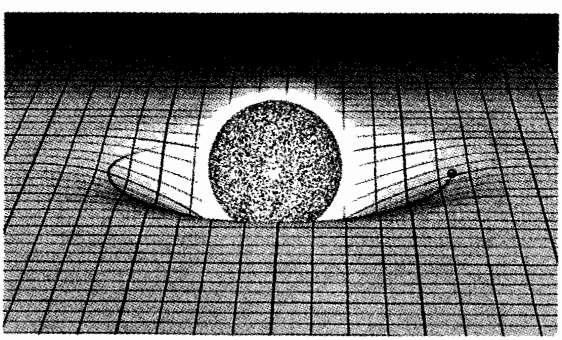


يتسبب جسم ثقيل مثل الشمس في اعوجاج نسيج الفضاء بشكل يشبه تأثير كرة البولينغ عند وضعها على غشاء من المطاط.

ويؤثر هذا الاعوجاج بدوره في الأجسام الأخرى التي تتحرك بالقرب من الشمس، حيث أن عليها الآن أن تعبر النسيج الفضائي المشوه. وباستخدام التشبيه بكرة البولينغ والغشاء المطاطي، فإننا لو وضعنا كرة صغيرة محملة على الغشاء ودفعناها بسرعة مبدئية صغيرة، فإن المسار الذي ستسلكه سيتوقف على ما إذا كانت كرة البولينغ موجودة في المركز أم لا. فإذا كانت كرة البولينغ غير موجودة فإن الغشاء المطاطي سيكون مستوياً، وستنتقل الكرة الصغيرة في خط مستقيم. أما إذا كانت كرة البولينغ موجودة وبالتالي سيعوَجّ الغشاء، فإن الكرة الصغيرة ستنتقل في مسارٍ منحنٍ. وفي الحقيقة، إذا أهملنا الاحتكاك، وإذا وضعنا الكرة الصغيرة ودفعناها لتتحركَ بالسرعة المناسبة وفي الاتجاه الصحيح، فإنها ستستمر في الحركة في مسار منحنٍ متكرر حول كرة البولينغ - وفي الحقيقة فإنها "ستتجه إلى مدار". وتبشر لغتنا بتطبيق هذا التشبه على الجاذبية.

تتسبب الشمس، مثل كرة البولينغ، في اعوجاج الفضاء المحيط بها، بينما تشبه حركة الأرض حركة الكرة الصغيرة وتعتمد على شكل الاعوجاج. أما الأرض فهي مثل الكرة الصغيرة تتحرك في مدار حول الشمس إذا كانت سرعتها ووجهتها مناسبتين. ونطلق عادة على هذا التأثير في حركة الأرض اسم تأثير جاذبية الشمس وهو الموضح في الشكل رقم (3-5). والفرق الآن هو أن آينشتاين، على عكس نيوتن، قد حدد آلية انتقال الجاذبية: وهي اعوجاج الفضاء. ومن وجهة نظر آينشتاين فإن مجال الجاذبية الذي يمسك بالأرض في مدارها ليس فعلاً لحظياً غامضاً للشمس، بل هو اعوجاج النسيج الفضائي الذي تسبب به وجود الشمس.

الشكل رقم (3-5)



تظل الأرض في مدار حول الشمس لأنها تدور على طول واد في النسيج الفضائي المعوج. وبلغة أكثر دقة، فإنها تتبع "مساراً ذا المقاومة الأقل" في النطاق المشوه حول الشمس.

وتسمح لنا هذه الصورة بفهم السمتين الأساسيتين للجاذبية بشكل جديد. أولاً، كلما زادت كتلة كرة البولينغ، كلما زاد التشوه الذي تسببه في الغشاء المطاطي. وبالمثل، في وصف آينشتاين للجاذبية، كلما زادت كتلة الجسم كلما زاد التشوه الذي يحدثه في الفضاء المكان المحيط به. ويعني ذلك أنه كلما زادت كتلة الجسم زاد تأثير الجاذبية التي يمارسها على الأجسام الأخرى، وهو بالضبط ما يتفق مع خبراتنا. ثانياً، تماماً كما فعل التشوه الناتج عن كرة البولينغ كلما بعدنا عنها، فإن مقدار الاعوجاج الفضائي الناتج من جسم ثقيل مثل الشمس يقل كلما بعدنا عنه. وينسجم ذلك مرة أخرى مع مفهومنا عن الجاذبية التي يضعف تأثيرها أكثر وأكثر كلما زادت المسافة بين الأجسام.

ولابد أن نذكر نقطة هامة هي أن الكرة الصغيرة نفسها تتسبب باعوجاج الغشاء المطاطي ولو بدرجة طفيفة. وبالمثل فإن الأرض كونها جسماً ذا كتلة فهي تتسبب أيضاً في اعوجاج النسيج الفضائي ولو بدرجة ضئيلة جدا مقارنة بالشمس. وبلغة النسبية العامة فإن هذا هو ما يجعل الأرض تمسك بالقمر في مداره، وما يجعل الأرض تحتفظ بكل منا ملتصقاً بسطحها. وكما يخترق متزلق الفضاء (Skydiver) الهواء في اتجاه الأرض، فإنه ينزلق خلال منخفض في النسيج الفضائي الذي تسببه كتلة الأرض. وفوق ذلك، فإن كل منا - مثل أي جسم ذي كتلة - يسبب اعوجاجاً في النسيج الفضائي يتناسب مع أجسامنا، على الرغم من أن الكتلة الصغيرة نسبياً لجسم الإنسان تجعل هذا التأثير ضئيلاً للغاية.

وباختصار، يتفق آينشتاين تماماً مع مقولة نيوتن "لابد من عامل مسبب للجاذبية"، لكنه قبل تحدي نيوتن الذي ترك فيه تحديد هذا العامل "لعناية قرائي". وعامل الجاذبية وفقا لآينشتاين هو نسيج الكون.

سادساً: قليل من التحذيرات

يعد التشبيه بالغشاء المطاطي وكرة البولينغ قيماً لأنه يعطينا صورة مرئية يمكن بواسطتها أن ندرك ما نعنيه بالاعوجاج في نسيج العالم. ويستخدم علماء الفيزياء غالباً هذه التشبيهات وتشبيهات أخرى مماثلة لترشد حدسهم بالنسبة للجاذبية والتحدب. وعلى الرغم من فائدة التشبيه بالغشاء المطاطي وكرة البولينغ إلا أنها ليست كاملة، وللتوضيح سنلفت الانتباه لبعض نقاط الضعف.

فأولاً، عندما تسبب الشمس اعوجاج نسيج الفضاء المكان من حولها فإن ذلك لا يرجع إلى "شدها إلى أسفل" بواسطة الجاذبية كما في حالة كرة البولينغ،

التي تسبب اعوجاج الغشاء المطاطي لأنها مشدودة في اتجاه الأرض بالجاذبية. أما في حالة الشمس فلا يوجد أي جسم آخر ليقوم بعملية "الشد". وفي المقابل فقد علّمنا آينشتاين أن اعوجاج الفضاء المكان هو نفسه الجاذبية. ويتسبب مجرد وجود جسم ذي كتلة في اعوجاج الفضاء كرد فعل. وبالمثل، لا تحتفظ الأرض بمدارها لأن هناك بعض الأجسام الخارجية التي تمارس عليها شدا جاذبياً على طول وديان الوسط الفضائي المعوج، كما في حالة الكرة الصغيرة على الغشاء المطاطي المعوج. وبدلاً من ذلك فقد بين آينشتاين أن الأجسام تتحرك خلال الفضاء المكان (خلال الزمكان بدقة أكثر) على طول أقصر المسارات الممكنة - أي "أسهل" المسارات الممكنة، "أو أقلها مقاومة". فإذا كان الفضاء معوجاً فإن مثل هذه المسارات ستتحدب. وهكذا، وعلى الرغم من أن نموذج الغشاء المطاطي وكرة البولينغ يعطينا تشبيهاً مرئياً جيداً للكيفية التي يمكن بها لجسم مثل الشمس أن يسبب اعوجاج الفضاء من حوله، وبالتالي يؤثر في حركة الأجسام الأخرى، إلا أن الآلية الفيزيائية التي تحدث بها تلك التشوهات مختلفة تماماً. وتروق الآلية الأولى لحدسنا عن الجاذبية في الإطار التقليدي لنيوتن، بينما تعيد الآلية الثانية صياغة الجاذبية بمدلول تحدب الفضاء.

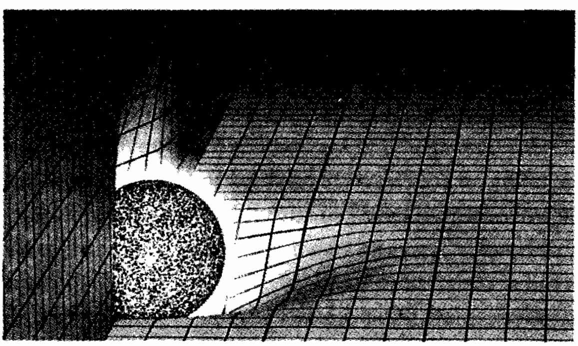
وتنبع نقطة الضعف الثانية للتشبيه بالغشاء المطاطي وكرة البولينغ من كون الغشاء المطاطي ذا بعدين. وفي الواقع، مع أنه أمر يصعب تخيله، إلا أن الشمس (وكل الأجسام ذات الكتلة الكبيرة الأخرى) تسبب اعوجاجاً للفضاء ذي الأبعاد الثلاثة المحيط بها. والشكل رقم (3-6) محاولة بدائية لتصور هذا؛ فالفضاء المحيط بالشمس يعاني نفس نوع التشوه سواء كان أسفل، أو على الجوانب، أو أعلى. ويصور الشكل رقم (3-6) تخطيطاً لعينة جزئية لذلك. وينتقل جسم مثل الأرض "خلال" الوسط الفضائي ثلاثي الأبعاد المعوج الناتج من وجود الشمس. وربما تجد أن هذا الشكل مربك - فلماذا لا تندفع الأرض إلى "الجزء الرأسي" من الفضاء المكان المحدب في الصورة؟ ولتأخذ في اعتبارك أن الفضاء ليس حاجزاً مادياً مثل الغشاء المطاطي. وبدلاً من ذلك، فإن الشبكات المعوجة في الصورة ليست سوى شرائح دقيقة تتخلل الفضاء ثلاثي الأبعاد المعوج الذي تنغمس فيه تماماً وتتحرك بحرية أنت والأرض وكل شيء آخر. وربما تجد أن هذا الأمر يزيد من صعوبة المشكلة: لماذا لا نشعر بالفضاء إذا كنا منغمسين داخل نسيجه؟ لكننا نشعر به. نحن نشعر بالجاذبية، وبأن الفضاء هو الوسط الذي تنتقل بواسطته قوة الجاذبية. وكما كان يقول عالم الفيزياء المتميز جون ويلر **John**

Wheeler واصفاً الجاذبية: "تمسك الكتلة بالفضاء المكان لتخبره كيف يتحدب، بينما يمسك الفضاء المكان بالكتلة ليخبرها كيف تتحرك"[8].

أما نقطة الضعف الثالثة في هذا التشبيه فهي أننا أهملنا بعد الزمن. وقد فعلنا ذلك لتوضيح الرؤية، لأنه بالرغم من ادعاء النسبية الخاصة بأننا يجب أن نفكر في البعد الزماني جنباً إلى جنب مع الأبعاد الفضائية الثلاثة المألوفة، إلا أنه من الصعب تماماً "رؤية" الزمان. غير أنه، وكما صورنا في مثال لعبة التورنادو، فإن التسارع - وبالتالي الجاذبية - تسبب اعوجاج كل من الفضاء والزمان. (في الحقيقة، تبين رياضيات النسبية العامة أنه في حالة حركة جسم بطيء نسبياً مثل دوران الأرض حول نجم نموذجي مثل الشمس، فإنه في الواقع يكون لاعوجاج الزمان تأثيراً على حركة الأرض أكثر كثيراً من اعوجاج الفضاء). وسنعود لمناقشة اعوجاج الزمان بعد الفقرة التالية.

وطالما أنك تحتفظ في ذاكرتك بهذه التحذيرات الثلاثة الهامة، فإنه من المقبول تماماً أن نستخدم صورة الفضاء المكان المعوج التي تزودنا بها كرة البولينغ فوق الغشاء المطاطي كموجز حدسي لرؤية آينشتاين الجديدة للجاذبية.

الشكل رقم (3-6)



عينة للفضاء ثلاثي الأبعاد المعوج الذي يحيط بالشمس.

سابعاً: حل التناقض

وبإدخال الفضاء والزمان كعاملين ديناميكيين، أوجد آينشتاين صورة ذهنية واضحة لكيفية عمل الجاذبية. ومع هذا، يظل السؤال المحوري هو ما إذا كانت

(8) مقابلة مع جون ويلر John Wheeler، في 27 كانون الثاني/ يناير 1998.

إعادة صياغة قوة الجاذبية قد حلت التناقض مع النسبية الخاصة، الذي يعيب نظرية نيوتن للجاذبية. نعم. ومرة ثانية، يعطينا التشبيه بالغشاء المطاطي الفكرة الأساسية. تخيل أن هناك كرة صغيرة تتدحرج في خط مستقيم على سطح غشاء مستوٍ في غياب كرة البولينغ. وبمجرد وضع كرة البولينغ فوق الغشاء ستتأثر حركة الكرة الصغيرة، ولكن ليس "لحظياً". وإذا صورنا تتابع الأحداث هذا في شريط سينمائي وعرضناه بالحركة البطيئة، فسنشاهد أن الاضطراب الناتج من وضع كرة البولينغ ينتشر مثل التموجات فوق سطح البركة وسيصل في النهاية إلى موضع الكرة الصغيرة. وبعد فترة وجيزة ستخمد الاهتزازات فوق السطح المطاطي مخلفة وراءها غشاءً معوجاً ساكناً.

وينطبق نفس الشيء على النسيج الفضائي. ففي عدم وجود أية كتلة يكون الفضاء مستوياً، وسيستقر أي جسم صغير بسعادة أو سينتقل بسرعة ثابتة فيه. أما إذا وجد جسم ذو كتلة كبيرة على الساحة، فإن الفضاء سيعوج - لكن مثل حالة الغشاء، فإن التشوه لن يكون لحظياً. بل سينتشر إلى الخارج مبتعداً عن الجسم الكثيف، ليستقر في النهاية داخل شكل معوج ينقل شد الجاذبية لهذا الجسم الجديد. وفي تشبيهاتنا فإن اضطرابات الغشاء المطاطي تنتقل بسرعة يحددها التركيب المادي الخاص بها. وفي الوضع الواقعي للنسبية العامة، تمكن آينشتاين من حساب سرعة انتقال الاضطرابات في نسيج العالم، ووجد أنها تنتقل بسرعة مساوية بالضبط لسرعة الضوء. ويعني هذا مثلاً في المثال الافتراضي الذي ناقشناه مسبقاً والذي فيه يؤثر زوال الشمس في الأرض بإحداث تغيرات ناتجة من الشد المتبادل بينهما بالجاذبية. ولن يظهر هذا التأثير لحظياً. بل مثلما يغير جسم من موضعه أو حتى ينفجر إلى أشلاء فسيتسبب ذلك في تغير التشوه في النسيج الزمكاني الذي ينتشر إلى الخارج بسرعة الضوء، خاضعا في ذلك للحد الأعلى للسرعة الكونية تبعاً للنسبية الخاصة. وبذا فإننا على كوكب الأرض سندرك تحطم الشمس في نفس اللحظة التي سنشعر فيها بآثار الجاذبية - حوالي ثماني دقائق بعد انفجارها. وبذلك تحل صياغة آينشتاين هذا التناقض؛ وتسير اضطرابات الجاذبية متوافقة مع الفوتونات ولا تسبقها.

ثامناً: مرة أخرى اعوجاج الزمان

تمثل الصور في الأشكال أرقام (3-2)، (3-4)، و(3-6) ما الذي يعنيه "اعوجاج الفضاء". فالاعوجاج يشوه شكل الفضاء وقد ابتكر علماء الفيزياء صوراً مشابهة في محاولة لتوضيح معنى "اعوجاج الزمان"، غير أن حل شفرة هذه

الصور كان في غاية الصعوبة، الأمر الذي جعلنا لا نستخدمها هنا. وبدلاً من ذلك سنستعين بمثال سليم وجيم في لعبة التورنادو، ونحاول أن نصل إلى إدراك كنه اعوجاج الزمان بفعل الجاذبية.

ولنفعل ذلك سنعود مرة أخرى إلى جورج وغريس اللذين أصبحا سابحين بالقرب من المنطقة المحيطة بالمجموعة الشمسية وليسا في ظلمات الفضاء الخارجي كما كانا من قبل. وما زالا يحملان ساعتين رقميتين كبيرتين متزامنتين على بذلتي الفضاء. وللتبسيط، فإننا سنهمل تأثير الكواكب ونأخذ في اعتبارنا فقط مجال جاذبية الشمس. ولنستمر في الخيال، نفترض وجود سفينة فضاء تحوم بالقرب من جورج وغريس، وأنها مدت حبلاً طويلاً يصل إلى قرب سطح الشمس. وسيستخدم جورج هذا الحبل ليهبط ببطء نحو الشمس. وأثناء ذلك كان يتوقف بين فترة وأخرى ليقارن معدل سريان الزمن على ساعتيهما. ويعني اعوجاج الزمان الذي تنبأت به النسبية العامة لآينشتاين أن ساعة جورج ستسير أبطأ فأبطأ مقارنة بساعة غريس كلما أصبح مجال الجاذبية الذي يوجد فيه أقوى فأقوى. أي أنه كلما اقترب أكثر من الشمس ستزداد سرعته بطءاً. وهكذا، فإن الجاذبية تشوه الزمان كما تفعل بالفضاء.

ولابد أن نلاحظ أن الوضع الحالي ليس به تماثل بين جورج وغريس على عكس الحالة الواردة في الفصل الثاني، حيث كان الاثنان يتحركان بسرعة ثابتة بالنسبة لبعضهما في فضاء خاوٍ. وسيشعر جورج بزيادة قوة الجاذبية أكثر فأكثر على عكس غريس، وعليه أن يقبض على الحبل بشدة أكثر وأكثر كلما اقترب من الشمس ليتجنب الانجذاب إليها. ويتفق الاثنان أن ساعة جورج هي الأبطأ. وليس هناك "منظور على نفس درجة الصحة" يمكن به أن يتبادلا الأدوار ويعكس النتيجة. كان هذا في الحقيقة هو ما وجدناه في الفصل الثاني عندما خضع جورج للتسارع بعد إشعاله للصاروخ المثبت على ظهره ليلحق بغريس. وقد نتج من التسارع الذي شعر به جورج بطء حاسم في ساعته بالنسبة لساعة غريس. وحيث أننا نعلم الآن أن الشعور بالحركة المتسارعة هو نفسه الشعور بقوة الجاذبية، فإن الوضع الحالي لجورج على الحبل يتضمن نفس المبدأ. ومرة أخرى نرى أن ساعة جورج وكل شيء آخر في حياته يسير بحركة أبطأ عند المقارنة بغريس.

في مجال جاذبية مثل المجال على سطح نجم عادي كالشمس، يكون التباطؤ في سير الساعات صغيراً جداً. فإذا كانت غريس مستقرة على بعد مليار ميل من الشمس، وعندما يكون جورج قد اقترب لمسافة بضعة أميال من سطح الشمس، فإن معدل دقات ساعته سيصبح حوالي 99,9998 بالمائة من معدل دقات

ساعة غريس أبطأ، لكن ليس كثيراً[9]. وإذا هبط جورج بواسطة حبل ليحوم قريباً جداً من سطح نجم نيوتروني مساوٍ في كتلته لكتلة الشمس، وأنه قد انسحق لتصبح كثافته (النجم النيوتروني) بضعة ملايين مليارات المرات أكبر من كثافة الشمس، فإن مجال الجاذبية الأكبر هذا سيتسبب في أن ساعة جورج ستدق بمعدل حوالي 76٪ من ساعة غريس. أما مجالات الجاذبية الأقوى مثل تلك الموجودة خارج ثقب أسود مباشرة (كما سنناقش ذلك في ما بعد)، فستحدث تباطؤاً أكثر في سريان الزمن، وسيتسبب معدل الجاذبية الأقوى في اعوجاج أكثر قسوة للزمن.

تاسعاً: التحقق التجريبي من النسبية العامة

أسرت النسبية العامة معظم من درسوها برشاقتها الجميلة. فقد قام آينشتاين بإحلال وجهة نظر نيوتن الميكانيكية الجافة عن الفضاء والزمان والجاذبية بوصف هندسي ديناميكي يتضمن الزمان المحدب. وقد غزل آينشتاين الجاذبية في النسيج الأساسي للعالم. وبدلاً من فرض الجاذبية كبنية إضافية، فقد أصبحت جزءًا من العالم في أكثر مستوياته الأساسية. وقد نتج من بعث الحياة في الفضاء والزمان، أن سمحنا لهما بأن يتحدبا ويعوجا ويتموجا، ما أصبحنا نشير إليه بصورة عامة باسم الجاذبية.

وإذا نحينا الجمال جانباً، فإن الاختبار النهائي لنظرية فيزيائية هو مقدرتها على تفسير الظواهر الفيزيائية والتنبؤ بها بدقة. وقد نجحت نظرية نيوتن للجاذبية في هذا الاختبار نجاحاً باهراً عند ظهورها في نهاية القرن السابع عشر وحتى بداية القرن العشرين. وسواء طبقت على الكرات المقذوفة في الهواء أو الأجسام التي

---

(9) وبالرغم من هذا فإن الساعات الذرية الحالية دقيقة بما فيه الكفاية لتكتشف مثل هذه الاعوجاجات الدقيقة - أو حتى الأكثر منها دقة. فمثلاً في سنة 1976، قام كل من روبرت فيسوت Robert Vessol ومارتين ليفين Martin Levine من مرصد هارفارد-سميثونيان الفلكي الفيزيائي بالاشتراك مع معاونين من وكالة الطيران والفضاء (ناسا) بإطلاق صاروخ سكوت D من جزيرة والوبس بفيرجينيا. كان الصاروخ يحمل ساعة ذرية دقيقة تصل دقتها إلى حوالى جزء من تريليون من الثانية في الساعة. وكانوا يأملون في إثبات أنه كلما ارتفع الصاروخ (وبالتالي يقل تأثير شد الجاذبية الأرضية عليه) فإن ساعة مماثلة موجودة على الأرض ومعرضة لقوى الجاذبية الكاملة ستدق بشكل ابطأ. وبواسطة إشارات ميكرووية في اتجاهين استطاع الباحثون مقارنة معدل دقات الساعتين الذريتين، وقد اتضح بالفعل أن الساعة الذرية الموجودة على ارتفاع 6000 ميل تدق أسرع بمقدار 4 أجزاء في المليار مقارنة بمثيلتها على الأرض، الأمر الذي يتفق مع التنبؤات النظرية بدقة أعلى من 0.01٪ (جزء من مائة في المائة).

تهوي من الأبراج المائلة أو المذنبات التي تدور في دوامات حول الشمس أو دوران الكواكب في مداراتها الشمسية، فقد قدمت نظرية نيوتن تفسيرات في غاية الدقة لكل هذه الملاحظات، كما أنها تنبأت بأشياء تحققت في عدد لا يحصى من المرات، وفي الكثير من المواقف. وكان الدافع وراء التساؤل، كما أكدنا من قبل، حول هذه النظرية الناجحة تجريبياً هو خاصية الانتقال اللحظي لقوة الجاذبية الذي يتعارض مع النسبية الخاصة.

ومع أن تأثير النسبية الخاصة يعد محورياً للفهم الأساسي للفضاء والزمان والحركة، إلا أنه ضئيل جداً في عالم السرعات البطيئة الذي نعيش فيه عادة. وبالمثل فإن الحيود بين النسبية العامة لآينشتاين - نظرية للجاذبية تتوافق مع النسبية الخاصة - ونظرية نيوتن للجاذبية هو الآخر صغير جداً في معظم المواقف العامة. وهذا أمرٌ جيد وسيئ في نفس الوقت. وهو جيد لأن أية نظرية تتوهم أنها ستحل محل نظرية نيوتن للجاذبية من الأفضل لها أن تنجح في ما سبق أن أكدته تجريبياً نظرية نيوتن. وهو سيئ لأنه يجعل من الحكم بين النظريتين تجريبياً أمراً صعباً. ويتطلب الحكم بين نظريتي نيوتن وآينشتاين أجهزة في غاية الدقة لاستخدامها .في تجارب حساسة جداً للطرق التي تختلف فيها النظريتان. فإذا قذفت بكرة بيسبول فإن أياً من النظريتين يمكن أن يتنبأ بمكان سقوط الكرة، لكن الإجابة ستختلف اختلافا ضئيلاً لدرجة أنه لا يمكننا اكتشافه تجريبيا بإمكاناتنا المتاحة. والمطلوب تجربة أكثر ذكاء، وقد اقترحها آينشتاين[10].

نحن نرى النجوم ليلاً، لكنها بالطبع موجودة أثناء النهار. لكننا عادة لا نراها لأن ضوء الشمس يطغى على ضوئها الضئيل والبعيد. وأثناء كسوف الشمس فإن

---

(10) في منتصف القرن التاسع عشر اكتشف العالم الفرنسي إيربان جان جوزيف ليفرييه (Urbain Jean Joseph Le Verrier) أن كوكب عطارد يحيد قليلاً عن مداره حول الشمس، الأمر الذي يتنبأ به قانون الجاذبية لنيوتن. وعلى مدى أكثر من نصف قرن استهلكت التفسيرات لهذا الانحراف كل الاحتمالات. تقدم حضيض مدار عطارد نحو الشمس (وبلغة أبسط فإن ذلك يعني أنه في نهاية كل دورة لا يصل عطارد إلى النقطة التي تتنبأ بها نظرية نيوتن) - تأثير جاذبية كوكب لم يكتشف بعد أو حلقة من الكويكبات أو قمر لم يكتشف بعد أو تأثير الغبار الكوني أو تأثير انبعاج الشمس - إلا أنها جميعاً لم تحظ بقناعة تكسبها القبول العام. في سنة 1915، حسب آينشتاين تقدم الحضيض الشمسي لكوكب عطارد مستخدماً معادلات النسبية العامة الجديدة، ووجد إجابة أسعدت وجيب قلبه، على حد قوله: تطابقت تماماً نتائج النسبية العامة مع الملاحظات. كان هذا النجاح بالتأكيد واحداً من الأسباب الواضحة التي أعطت آينشتاين ثقة كافية في نظريته، لكن معظم الآخرين انتظروا تأكيداً لهذه التنبؤات وليس مجرد تفسير لانحراف معروف مسبقاً. ولمزيد من التفاصيل، راجع Abraham Pais, "*Subtle is the Lord*": *The Science and The Life of Albert Einstein* (Oxford; NewYork: Oxford University Press, 1982), p. 253.

القمر يحجب ضوءها مؤقتاً ويصبح من الممكن رؤية النجوم البعيدة. ومع ذلك فإنه ما زال لوجود الشمس تأثير. ولابد أن يعبر الضوء القادم من بعض النجوم البعيدة بالقرب من الشمس وهو في طريقه إلى الأرض. وتتنبأ النسبية العامة لآينشتاين بأن الشمس ستسبب اعوجاجاً للفضاء والزمان، وأن مثل هذا التشوه "سيؤثر في مسار ضوء النجم". وفي النهاية، فإن الفوتونات القادمة من مصدر بعيد تنتقل على طول نسيج العالم، فإذا كان هذا النسيج معوجاً، فسيؤثر ذلك في حركة الفوتون بالضبط كما يتأثر الجسم المادي. ويكون انحناء مسار الضوء هو الأكبر للإشارات الضوئية التي تكاد تمس الشمس وهي في طريقها إلى الأرض. ويمَكّننا الكسوف الشمسي من رؤية مثل هذا التلامس بين الشمس وضوء النجم من دون أن يطمسه ضوء الشمس نفسه.

ويمكن قياس زاوية انحناء مسار الضوء بطريقة بسيطة. فانحناء مسار ضوء النجم يؤدي إلى إزاحة في الموضع "الظاهري" للنجم. ويمكن قياس هذا الانحراف بدقة بمقارنة الموضع الظاهري بالموضع الفعلي لنفس النجم والمعروف من رصد النجوم ليلاً (في غياب تأثير الاعوجاج الذي ينتج من الشمس)، والذي يجري عندما تكون الأرض في موضع مناسب، أي حوالي ستة أشهر قبل أو بعد الكسوف. وفي تشرين الثاني/نوفمبر 1915 استخدم آينشتاين مفهومه الجديد عن الجاذبية لحساب زاوية الانحناء التي ستلامس بها بالكاد إشارة ضوء النجم الشمسي، ووجد أنها حوالي 0,00049 من الدرجة (1,75 ثانية، والثانية في الزوايا هي $\frac{1}{3600}$ من الدرجة). وهذه الزاوية الصغيرة جداً تساوي الزاوية التي يصنعها سمك قطعة نقود معدنية (1/4 دولار) إذا وضعتها على بعد ميلين من المشاهد رأسياً. وقد كان قياس مثل هذه الزاوية الصغيرة في متناول تقنية ذلك الوقت. وتحت إلحاح من سير فرانك دايسون مدير مرصد غرينويتش، نظم سير آرثر إدينغتون، الفلكي المشهور وسكرتير الجمعية الملكية للفلك بإنكلترا، بعثة استكشاف إلى جزيرة برينسيب الواقعة على الساحل الغربي لإفريقيا وذلك لاختبار تنبؤات آينشتاين أثناء كسوف الشمس يوم 29 أيار/مايو 1919.

وفي 6 تشرين الثاني/نوفمبر 1919، وبعد حوالى خمسة أشهر من تحليل الصور المأخوذة أثناء كسوف الشمس في جزيرة برينسيب (وصور أخرى للكسوف التقطت بواسطة فريق بريطاني آخر بقيادة تشارلز دافيدسون وأندرو كروميلين في سوبرال بالبرازيل) تم الإعلان في اجتماع مشترك بين الجمعية الملكية والجمعية الفلكية الملكية أن تنبؤات آينشتاين القائمة على النسبية العامة قد تأكدت. وقد استغرق انتشار هذا النجاح - قلب مفاهيمنا عن المكان والزمان تماماً - خارج

نطاق مجتمع الفيزياء بعض الوقت، الأمر الذي جعل من آينشتاين شخصية مشهورة في جميع أنحاء العالم. وقد جاءت افتتاحية جريدة لندن تايمز يوم 7 تشرين الثاني/ نوفمبر 1919 بالبنط الكبير، كما يلي:

"ثورة في العلوم - نظرية جديدة عن العالم - نسف أفكار نيوتن"[(11)].

وكانت هذه لحظة المجد لآينشتاين.

وفي السنوات التي تلت هذه التجربة، خضعت تأكيدات إدينغتون للنسبية العامة لتدقيق حرج. وقد جعلت الصعوبات العديدة ودقة إجراء القياس في هذه التجربة من الصعب تكرارها مرة أخرى، وأوجدت بعض التساؤلات في ما يتعلق بأحقية التجربة الأصلية في المصداقية. إلا أنه خلال الأربعين سنة الأخيرة وباستخدام التقدم التكنولوجي، تم اختبار السمات العديدة للنسبية العامة بدقة عالية بواسطة مجموعة متنوعة من التجارب. وقد تم التأكد بصورة رائعة من تنبؤات النسبية العامة. ولا يوجد بعد الآن أي شك في أن وصف آينشتاين للجاذبية ليس فقط متوافقاً مع النسبية الخاصة، لكنه يعطي تنبؤات أقرب للنتائج التجريبية من تلك التي تعطيها نظرية نيوتن.

عاشراً: الثقوب السوداء والانفجار الهائل وتمدد الفضاء

وبينما تظهر النسبية الخاصة جلياً عندما تتحرك الأشياء بسرعات عالية، فإن النسبية العامة تصبح جلية واضحة عندما تصبح الأشياء ذات كتلة كبيرة ويصبح الاعوجاج في الفضاء والزمان بالتالي محسوساً. ولنشرح هنا مثالين.

المثال الأول اكتشاف تم بواسطة الفلكي الألماني كارل شوارزتشايلد، عندما كان يدرس اكتشافات آينشتاين في الجاذبية أثناء قيامه بحسابات مسار قذائف المدفعية على الجبهة الروسية أيام الحرب العالمية الأولى سنة 1916. وقد تمكن شوارزتشايلد من استخدام النسبية العامة بذكاء بمجرد مضي عدة شهور فقط على وضع آينشتاين لمساته الأخيرة عليها. اكتسب شوارزتشايلد فهماً كاملاً ودقيقاً للكيفية التي يعوج بها الفضاء والزمان قريباً جداً من نجم تام التكور. وقد أرسل شوارزتشايلد بنتائجه من الجبهة الروسية إلى آينشتاين الذي قام بدوره بتقديمها للأكاديمية البروسية نيابة عن شوارزتشايلد.

وفي ما عدا التأكيد الرياضي ودقته التي جعلت الاعوجاج - الذي صورنا

(11) Robert P. Crease and Charles C. Mann, *The Second Creation: Makers of the Revolution in Twentieth - Century Physics, rev. ed.* (New Brunswick, N.J.: Rutgers University Press, 1996), p. 39.

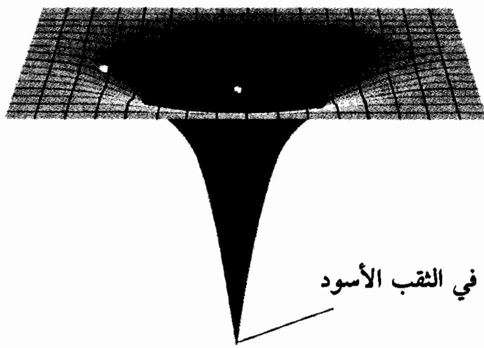
تخطيطاً له في الشكل رقم (3-5) - أكثر دقة، فإن أعمال شوارزتشايلد - التي أصبحت معروفة الآن باسم "حل شوارزتشايلد" - قد كشفت النقاب عن تطبيقات مذهلة للنسبية العامة. وقد بين أنه إذا ركزت كتلة نجم في نطاق كروي صغير للدرجة التي يصبح فيها ناتج قسمة الكتلة على نصف القطر رقماً يتجاوز قيمة حرجة معينة، فإن الاعوجاج في الزمكان الناتج من ذلك سيكون من الشدة لدرجة أن أي شيء، بما في ذلك الضوء، يقترب بشدة من هذا النجم لن يتمكن إطلاقاً من الهرب من قبضة جاذبيته. ولأن الضوء - حتى الضوء - لا يتمكن من الهرب من مثل هذه "النجوم المضغوطة" فقد أطلق عليها في البداية النجوم "المظلمة" أو "المتجمدة". وقد صك جون ويلر في ما بعد اسماً أكثر ألفة هو "الثقوب السوداء" - وهي سوداء لأنها لا تسمح بمرور الضوء، وثقوب لأن أي شيء يقترب منها سيسقط فيها من دون رجعة. وقد لصق بها هذا الاسم.

وقد صورنا حل شوارزتشايلد في الشكل رقم (3-7). ومع أن للثقوب السوداء سمعة بشعة، فإن الأجسام التي تمر على "مسافة آمنة" منها ستحيد بنفس الشكل كما لو كانت تمر على نجم عادي، لتستمر في طريقها. لكن الأجسام مهما كان تركيبها، والتي تقترب أكثر من اللازم - أقرب مما يطلق عليه أفق الحدث (Event Horizon) للثقب الأسود - فإن مصيرها الاقتناص، وستنجذب بعناد في اتجاه مركز الثقب الأسود، وستتعرض لضغوط جاذبية تتزايد باستمرار لتسحقها في النهاية. فمثلاً، إذا وضعت قدمك أولا داخل أفق الحدث، وعند اقترابك أكثر من مركز الثقب الأسود، ستجد نفسك منزعجاً في اطراد. وستزداد قوة جاذبية الثقب الأسود بشكل هائل لدرجة أن شدها لقدمك سيكون أكبر كثيراً من شدها لرأسك (حيث أنك قد أدخلت قدمك أولا فستكون هي الأقرب دائماً من رأسك بالنسبة لمركز الثقب الأسود)؛ وفي الواقع سيكون هذا الشد على درجة من القوة بحيث أنك ستستطيل للدرجة التي سيتمزق فيها جسدك بسرعة إلى أشلاء.

وعلى العكس من ذلك، إذا كنت أكثر حنكة في جولتك بالقرب من الثقب الأسود، وكنت حريصاً بشدة ألا تتخطى أفق الحدث، فيمكنك استغلال الثقب الأسود في عمل مدهش. تخيل، مثلاً، أنك ستكتشف ثقباً أسود كتلته أكبر من الشمس بحوالي ألف مرة، وأنك ستقترب بواسطة حبل لمسافة بوصة واحدة من أفق الحدث للثقب الأسود، تماماً كما فعل جورج بالقرب من الشمس. تتسبب مجالات الجاذبية، كما ناقشنا من قبل، في اعوجاج الزمان، ويعني ذلك أن الزمن سيتباطأ بالنسبة لك. وفي الحقيقة، وحيث أن للثقوب السوداء مجالات جاذبية قوية، فإن مرور الزمن بالنسبة لك سيتباطأ أكثر وأكثر. وستدق ساعتك عشرة آلاف

مرة تقريباً أبطأ من ساعة أصدقائك الموجودين على الأرض، وإذا كنت ستحوم قريباً جداً فوق أفق الحدث للثقب الأسود بهذه الطريقة لمدة عام، ثم تسلقت الحبل عائداً إلى سفينة الفضاء المكان لتقضي رحلة قصيرة ترفيهية في الوطن، فإنك ستكتشف بمجرد وصولك إلى الأرض أنه قد مر أكثر من عشرة آلاف عام من رحيلك. وبذا تكون قد استخدمت الثقب الأسود كنوع من آلات الزمان بنجاح، الأمر الذي يسمح لك بالسفر في المستقبل البعيد للأرض.

الشكل رقم (3-7)



يحدث الثقب الأسود اعوجاجاً في نسيج الزمكان المحيط به بشدة لدرجة أن أي شيء يدخل في نطاق "أفق الحدث" الخاص به، والذي تمثله الدائرة الداكنة - لا يمكن أن يهرب من قبضة جاذبيته. ولا أحد يعرف بالضبط ما الذي يحدث داخل أعمق نقطة في الثقب الأسود.

ولإدراك المقاييس المفرطة المتضمنة، فإن نجماً له كتلة الشمس يصبح ثقباً أسود إذا تحول نصف قطره من قيمته الحقيقية الآن (حوالي 450000 ميل) إلى أقل قليلاً من ميلين. وتخيل: لو اعتصرنا الشمس لتصبح في حجم جزيرة مانهاتن العليا. وستزن ملء ملعقة صغيرة من مثل هذه الشمس المضغوطة مقدار وزن جبل إيفرست. وإذا أردنا تحويل كوكب الأرض إلى ثقب أسود، فعلينا أن نضغطه إلى كرة نصف قطرها أقل من نصف بوصة. ظل علماء الفيزياء لمدة طويلة متخوفين في ما يتعلق بالتركيب العائق للمادة وإمكانية وجوده. وقد اعتقد الكثير منهم أن الثقوب السوداء مجرد انعكاسات لخيال العلماء النظريين الذين أنهكهم العمل.

إلا أنه خلال العقد الأخير (من القرن العشرين) تراكم عدد متزايد من الأدلة التجريبية على وجود الثقوب السوداء. وطبعاً، ولأنها ثقوب سوداء، فلم يكن من

الممكن رؤيتها مباشرة بواسطة مسح السماء بالتلسكوبات. وبدلاً من ذلك، فإن الفلكيين يبحثون عن الثقوب السوداء بالبحث عن سلوك غير عادي للنجوم العادية المشعة للضوء، والتي يمكن أن تتواجد قريبة جداً من أفق الحدث لثقب أسود. وعلى سبيل المثال، عندما يتساقط الغبار والغاز الصادر من الطبقات العليا لنجوم عادية قريبة من ثقب أسود، في اتجاه أفق الحدث لهذا الثقب، فإنها ستتسارع إلى أن تصل سرعتها قرب سرعة الضوء. وعند سرعات مثل هذه تتولد كمية هائلة من الحرارة نتيجة الاحتكاك الذي يحدث داخل الجيشان العظيم للمادة المندفعة في دوامات إلى أسفل، الأمر الذي سيسبب توهج خليط الغبار والغاز ليبث الضوء العادي والأشعة السينية، حيث أن هذا الإشعاع ينتج قريباً جداً من أفق الحدث، فإنه سيتمكن من الإفلات من الثقب الأسود ليسافر خلال الفضاء المكان حيث يمكن مشاهدته ودراسته مباشرة. وتعطي النسبية العامة تنبؤات تفصيلية عن خواص مثل هذه الانبعاثات للأشعة السينية. وتقدم الملاحظات حول هذه الخواص المتوقعة أدلة قوية، وإن كانت غير مباشرة، على وجود الثقوب السوداء. فمثلاً، هناك تلال من الأدلة التي تشير إلى وجود ثقب أسود كثيف الكتلة، التي تعادل مليونين ونصف المليون مرة كتلة الشمس في مركز مجرتنا درب اللبانة. ويبدو هذا الثقب الأسود العملاق خافتاً إذا قورن بما يعتقد الفلكيون أنه موجود في قلب الكوازارات البراقة المدهشة والمنتشرة في كل الكون: وهي ثقوب سوداء قد تبلغ كتلتها مليارات المرات مقدار كتلة الشمس.

توفي شوارزتشايلد في غضون بضعة أشهر فقط من توصله إلى الحل المعروف باسمه، وذلك بسبب إصابته بمرض جلدي أثناء وجوده على الجبهة الروسية. كان عمره وقتها 42 عاماً فقط. وقد كشف اتصاله القصير بنظرية آينشتاين للجاذبية عن وجه مذهل وغامض من أوجه العالم الطبيعي.

والمثال الثاني الذي تستعرض فيه النسبية العامة عضلاتها يتعلق بأصل وتطور كل الكون. وكما رأينا من قبل فإن آينشتاين قد بيّن أن المكان والزمان يتجاوبان مع وجود الكتلة والطاقة. ويؤثر هذا التشوه للزمكان في حركة الأجرام الكونية التي تتحرك بالقرب من الاعوجاج الناتج. وللطريقة الدقيقة التي تتحرك بها هذه الأجسام، بدورها، نتيجة لكتلتها وطاقتها، تأثير أبعد في اعوجاج الزمكان، والذي بدوره هو الآخر يؤثر في حركة الأجسام، وهكذا يستمر أداء هذا الرقص الكوني المتشابك. وبفضل معادلات النسبية العامة، وهي المعادلات المتأصلة في عمق هندسة الفضاء المحدب، والتي كان أول من أوجدها عالم الرياضيات العظيم في القرن التاسع عشر جورج برنارد ريمان (سيأتي ذكره في ما بعد)، تمكّن آينشتاين

من شرح التطور المتبادل بين الفضاء والزمان والمادة بصورة كمية. وقد دهش آينشتاين بصورة عظيمة عندما طبق هذه المعادلات على الكون ككل وليس على حيز معزول مثل كوكب أو مذنب يدور حول نجم، وقد توصل إلى نتيجة عظيمة هي: أن الحجم الشامل للعالم المكاني لابد أن يتغير مع الزمان. أي أن النسيج الكوني لابد أن يتمدد أو يتقلص ولا يمكن أن يكون ثابتاً. وتبين معادلات النسبية العامة ذلك بجلاء.

كانت النتيجة أكثر من المتوقع حتى بالنسبة لآينشتاين. فقد قلب آينشتاين الحدس الجماعي في ما يتعلق بطبيعة الفضاء والزمان، التي رسخت من خلال خبرات حياتنا اليومية على مدى آلاف السنين، غير أن مفهومنا عن عالم موجود دائما ولا يتغير أبداً كان مغروساً داخلنا بشدة حتى بالنسبة لمفكر راديكالي مثل آينشتاين بحيث يصعب التخلي عنه. ولهذا السبب أعاد آينشتاين النظر في معادلاته ونقحها بإدخال عامل أطلق عليه اسم الثابت الكوسمولوجى (Cosmological Constant)، وهو مصطلح إضافي سمح له بأن يتجنب هذا التوقع وينعم مرة أخرى بسكينة عالم استاتيكي لا يتغير. إلا أنه بعد مرور 12 عاماً، ومن خلال قياسات تفصيلية للمجرات البعيدة، أرسى الفلكي الأمريكي إدوين هابل تجريبياً مبدأ "تمدد الكون". وتبعاً لرواية مشهورة الآن في حوليات العلوم، فإن آينشتاين قد عاد مرة أخرى إلى الصيغة الأصلية لمعادلاته، مسجلاً أن التعديلات المؤقتة التي أدخلها عليها تمثل أكبر خطأ في حياته[12] وعلى الرغم من عدم تقبله في البداية، إلا أن نظريته (نظرية آينشتاين) قد تنبأت بتمدد العالم. وفي الحقيقة، وفي بداية العشرينيات من القرن العشرين - وقبل قياسات هابل بسنوات - استخدم عالم الأرصاد الجوية الروسي فريدمان معادلات آينشتاين الأصلية بشيء من التفصيل ووجد أن كل المجرات قد تكون محمولة على قاعدة من نسيج فضائي متمدد، وبالتالي فهي تتسارع مبتعدة بعضها عن البعض. وقد أكدت بما لا يدع مجالاً للشك ملاحظات هابل وما تبعها من ملاحظات عديدة هذه النتيجة المدهشة للنسبية العامة. وقد أنجز آينشتاين واحداً من أعظم الأعمال الفكرية في كل العصور، وذلك بتقديمه تفسيراً لتمدد الكون.

وإذا كان النسيج الفضائي يتمدد، وبالتالي تزداد المسافة بين المجرات المحمولة في التيار الكوني تباعداً، فلنا أن نتخيل استرجاع التطور في الاتجاه

(12) وللغرابة فإن الأبحاث الحديثة حول تفاصيل معدل تمدد الكون تشير إلى أن الكون قد يتضمن ثابتاً كونياً صغيراً جداً لكنه لا يساوي الصفر.

العكسي للزمن لنعرف أصل الكون. وفي الاتجاه العكسي ينكمش نسيج الفضاء جالباً جميع المجرات أقرب فأقرب بعضها من بعض. وكما هو الحال في حلة البخار وما تحتويه، فإن الكون المتقلص الذي ضغط المجرات مع بعضها، سيسبب زيادة هائلة في درجة الحرارة، وتتحلل النجوم، وتتكون بلازما ساخنة من المكونات الأولية للمادة. وباستمرار تقلص هذا النسيج سترتفع درجة الحرارة بلا حدود كما سيحدث نفس الشيء لكثافة البلازما البدائية. وإذا تخيلنا رجوع الساعة إلى الوراء بدءًا من الزمن الحالي للعالم الذي نشاهده الآن إلى حوالي 15 مليار سنة مضت، فإن الكون الذي نعرفه سينسحق إلى حجم متناهي الصغر. وستنكمش وتعتصر المادة التي يصنع منها "كل شيء" - كل سيارة ومنزل وبناية وجبال على كوكب الأرض، وكوكب الأرض نفسه والقمر وزحل والمشتري وكل كوكب آخر، والشمس وكل نجم في درب اللبانة، ومجرة أندروميدا بمئات المليارات من النجوم وكل المائة مليار مجرة - بقدر كوني إلى كثافة مذهلة. وكلما دارت الساعة للوراء في اتجاه أزمنة مبكرة أكثر وأكثر سينضغط كل الكون إلى حجم برتقالة ثم ليمونة ثم حبة بازلاء ثم حبة رمل وإلى حجم أقل من ذلك. وإذا سرنا في هذا الدرب إلى الوراء حتى "البداية" فإن العالم سيظهر وكأنه بدأ كنقطة - وهي الصورة التي سنعيد اختبارها في فصول قادمة - حيث ينحصر داخلها كل المادة والطاقة معاً إلى كثافة ودرجة حرارة لا يمكن تخيلهما. ومن المعتقد أن هذه الكرة النارية، الانفجار الهائل، قد تفجر عن هذا الخليط المتطاير الذي بذر البذور التي تطور منها الكون الذي نعرفه.

وصورة الانفجار الهائل كانفجار كوني ينفث المحتوى المادي للكون مثل شظايا نتجت من انفجار قنبلة، هي صورة مفيدة نأخذها في اعتبارنا، إلا أنها خادعة بعض الشيء. فعندما تنفجر القنبلة، فإن هذا يحدث في موضع معين "في الفضاء" وفي لحظة معينة "في الزمان"، وتتناثر محتوياتها في الفضاء المحيط. أما في حالة الانفجار الهائل فلا يوجد فضاء مكان محيط. فكلما عدنا بتطور الكون إلى الوراء حتى البداية، فإن اعتصار كل المحتوى المادي معاً يحدث نتيجة لتقلص كل الفضاء. ويصف حجم البرتقالة، ثم حجم حبة البازلاء، فحجم حبة الرمل، تصف عودة تطور الكون إلى الوراء، كل الكون، وليس شيئاً ما في الكون. وبالوصول إلى البداية، فلن يكون هناك فضاء خارج القنبلة اليدوية التي في حجم رأس الدبوس. وبدلاً من ذلك، فإن الانفجار الهائل هو انفجار الفضاء المكان المضغوط والذي يشبه انتشاره موجة المد التي تحمل معها المادة والطاقة حتى يومنا هذا.

حادي عشر: هل النسبية العامة صحيحة؟

لم نجد حتى الآن أي انحرافات عن تنبؤات النسبية العامة أثناء التجارب التي تجري بالمستوى الحالي للتقنية، والزمن فقط هو الكفيل باكتشاف بعض الانحرافات إن وجدت بواسطة تجارب أكثر دقة في النهاية. وعليه فإن هذه النظرية ستظهر كذلك على أنها مجرد وصف تقريبي لكيفية عمل الطبيعة في الواقع. ويعتبر الاختبار المنظم للنظريات على مستويات أكثر فأكثر دقة بالتأكيد أحد الطرق التي يتقدم بها العلم، لكنه ليس الطريق الوحيد. وقد رأينا ذلك بالفعل: فالبحث عن نظرية جديدة للجاذبية لم يبدأ بتفنيد تجريبي لنظرية نيوتن، لكنه بدأ بالتناقض بين نظرية نيوتن للجاذبية ونظرية أخرى - هي النسبية الخاصة. وفقط بعد اكتشاف النسبية العامة كنظرية منافسة للجاذبية تم تحديد عيوب تجريبية في نظرية نيوتن بالبحث عن وسائل دقيقة تسمح بقياس الخلاف بين النظريتين. وهكذا فإن عدم التطابق الداخلي النظري يمكن أن يلعب دوراً محورياً في دفع التقدم كما تفعل البيانات التجريبية.

وعلى مدى النصف الأخير من القرن العشرين، واجهت الفيزياء تناقضاً نظرياً آخر على قدم المساواة في الشدة مع التناقض بين النسبية الخاصة وجاذبية نيوتن. فقد بدت النسبية العامة غير متوافقة في أساسها مع نظرية أخرى اختبرت تجريبياً بنجاح وهي ميكانيكا الكم. وبالنظر في كل ما تم تغطيته في هذا الفصل، فإن التناقض لا يسمح لعلماء الفيزياء بفهم ما يحدث بالفعل للفضاء والزمان والمادة عندما سحقت بعضها مع بعض تماماً في لحظة الانفجار الهائل أو في مركز ثقب أسود. غير أن التناقض بصفة عامة ينبهنا إلى النقص الأساسي في مفهومنا للطبيعة. وقد أثمر حل هذا التناقض في محاولات قام بها بعض أعظم علماء الفيزياء النظريين، الذين أعطوا هذا التناقض ما يستحقه من أهمية، فصار المشكلة المحورية في الفيزياء النظرية الحديثة. ويتطلب الأمر التآلف مع بعض السمات الأساسية لنظرية الكم، التي سنلجأ إليها الآن، لفهم هذا التناقض.

الفصل الرابع

الغرابة المخيفة المجهرية

توجه جورج وغريس مباشرة بعد عودتهما من رحلتهما الفضائية عبر النظام الشمسي، إلى إحدى الحانات ليتناولا بعض المشروبات المنعشة حيث كانا متعبين بعض الشيء. طلب جورج لنفسه مشروبه المعتاد من عصير البابايا ولغريس الفودكا مع مياه التونيك، جلس جورج مسترخياً في مقعده عاقداً يديه خلف رأسه ليستمتع بسيجاره الذي أشعله لتوه. وبمجرد أن هيأ نفسه لأخذ جرعة من الدخان، دهش لاختفاء السيجار من بين شفتيه. تخيل جورج أن السيجار قد سقط من فمه بطريقة ما، فاعتدل في مقعده متوقعاً أن يجد السيجار قد أحدث حرقاً في قميصه أو بنطلونه. لكن السيجار لم يكن هناك، ولم يعثر عليه جورج. أثارت حركات جورج المضطربة غريس، وأخذت تتجول ببصرها في ما حولها فوقع على السيجار ملقى على منضدة البار خلف مقعد جورج مباشرة. "يا للغرابة"، قالها جورج ثم استطرد "كيف سقط هذا السيجار هناك بحق السماء؟ كما لو أنه قد مر من خلال رأسي - لكن لساني لم يحترق، وكما يبدو ليس لدي أية ثقوب". فحصت غريس جورج وأكدت على مضض أن لسانه ورأسه سليمان تماماً. وصلت مشروباتهما في هذه اللحظة، فهز جورج وغريس كتفيهما معتبرين أن سقوط السيجار واحدة من غرائب الحياة الصغيرة. لكن الغرائب في الحانة قد استمرت.

نظر جورج في كوب عصير البابايا فلاحظ أن مكعبات الثلج تتراقص باستمرار مصطدمة بعضها ببعض وبجدار الكوب مثل السيارات الكهربية الصغيرة في ساحة اللعب عندما تتصادم وتتباعد طوال الوقت. لم يكن وحده الذي تعرض لذلك هذه المرة. فقد كانت غريس تمسك بكأسها الذي كان في نصف حجم كوب جورج، عندما رأى كلاهما أن مكعبات الثلج في كأسها تتراقص بوتيرة أسرع. لم يكن في استطاعتهما التمييز بين مكعبات الثلج، فقد تجمعت المكعبات في كتلة واحدة. لكن كل هذا هيِّن إذا قورن بما حدث بعد ذلك. وبينما كان جورج وغريس يحدقان بأعين مبهورة من الدهشة، إذا بهما يريان مكعباً وحيداً من الثلج يمر من خلال جدار كأسها ليسقط على الأرض. أمسكا بالكأس وفحصاه

فوجداه سليماً تماماً؛ وبطريقة ما فإن مكعب الثلج قد عبر مباشرة من خلال الجدار الصلب من دون أن يسبب أي تلف. فقال جورج: "لابد أنها هلوسة ما بعد السير في الفضاء المكان". حاول كل منهما أن يتجاوز ما حدث لمكعبات الثلج، وتناولا شرابهما جرعة واحدة ثم توجها إلى البيت طلبا للراحة. ولم يتخيل جورج وغريس أثناء اندفاعهما للخروج من الحانة أنهما قد أخطآ الباب الحقيقي واصطدما بدلاً من ذلك برسم لباب على الجدار. غير أن أحداً من الحاضرين في الحانة لم يلحظ الاندفاع المفاجئ لجورج وغريس أثناء رحيلهما لتعود الحاضرين على اصطدام الناس بالجدار.

وبينما كان كونراد وفرويد يشعلان بالضوء أعماق الظلام وروحه منذ قرن مضى، كان الفيزيائي الألماني ماكس بلانك يلقي بأول شعاع من الضوء على ميكانيكا الكم. وهي إطار للمفاهيم يزعم، ضمن أشياء أخرى، أن ما حدث لجورج وغريس في الحانة - عند تحليله على مستوى العالم المجهري - يجب ألا نرجعه إلى اضطرابات ذهنية. فمثل هذه الأحداث العجيبة غير المألوفة هي أمر عادي للكيفية التي يسلك بها عالمنا في الواقع على المستوى فائق الصغر.

أولاً: الإطار الكمي

ميكانيكا الكم هي إطار من المفاهيم لإدراك الخواص المجهرية للكون. وكما تتطلب النسبية الخاصة والنسبية العامة تغيرات جوهرية في نظرتنا للكون عندما تكون الأشياء متحركة بسرعات هائلة أو عندما تكون لها كتل عظيمة، فإن ميكانيكا الكم تبين أن للكون صفات مدهشة بنفس الدرجة بل حتى أكثر إدهاشاً عندما نفحصه على المستوى الذري وتحت الذري. وقد كتب ريتشارد فينمان أحد أعظم المشتغلين بميكانيكا الكم سنة 1965 يقول:

> مضى زمن كانت الصحف تكتب فيه أن هناك اثني عشر رجلاً فقط هم الذين يفهمون نظرية النسبية. ولا أعتقد أن هذا صحيح. فربما كان هناك زمن لم يكن فيه سوى رجل واحد هو الذي يفهمها لأنه هو الذي أمسك بها قبل أن يكتب بحثه. لكن بعد أن اطلع الناس على البحث فإن الكثيرين منهم قد فهموها بشكل أو بآخر، وبالتأكيد كان عددهم أكثر من اثني عشر. ومن جهة أخرى فإنني أعتقد أنه يمكن أن أقول بكل ثقة أنه لا أحد يفهم ميكانيكا الكم[1].

(1) Richard Feynman, *The Character of Physical Law* (Cambridge, MA: MIT Press, 1965), p. 129.

وعلى الرغم من أن فينمان قد عبر عن وجهة نظره منذ أكثر من ثلاثة عقود، إلا أنه يمكن القول إنها صحيحة بنفس الدرجة حتى اليوم. وما كان يعنيه فينمان هو أنه على الرغم من أن نظريتي النسبية العامة والخاصة تتطلبان مراجعة شاملة للطريقة السابقة التي كنا ننظر بها للكون، عندما كنا نتقبل تماماً المبادئ الأساسية للنظريتين، فإن التضمينات غير المألوفة للمكان والزمان تأتي مباشرة من التفسير المنطقي الدقيق. وإذا فكرت ملياً في تفاصيل أبحاث آينشتاين في الفصلين السابقين بعناية مناسبة، فإنك - ولو لوهلة قصيرة - ستقر بحتمية النتائج التي توصلنا إليها. لكن ميكانيكا الكم تختلف. وبحلول سنة 1928، أو حول ذلك، كان الكثير من المعادلات الرياضية وقواعد ميكانيكا الكم قد استقرت في مكانها، ومنذ ذلك الحين استخدمت وما زالت لإجراء أكثر التنبؤات العددية نجاحاً ودقةً في تاريخ العلم. وفي الواقع فإن من يستخدم ميكانيكا الكم يجد نفسه متتبعاً للقواعد والمعادلات التي أرساها "الآباء المؤسسون" للنظرية - الطرق الحسابية الجاهزة للاستخدام المباشر - من دون فهم حقيقي لأسباب صلاحية هذه الطريقة وما الذي تعنيه. وعلى عكس النسبية، فإن القليلين فقط، إن وجدوا، هم الذين يفهمون تماماً روح ميكانيكا الكم.

ما الذي يمكن أن نستنتجه من ذلك؟ وهل يعني ذلك أن العالم على المستوى الميكروسكوبي يعمل بطرق غاية في الغرابة وغير مألوفة لدرجة أن العقل البشري، الذي تطور على مر العصور ليدرك ظواهر الحياة اليومية المألوفة، غير قادر على الإدراك الكامل "لما يجري بالفعل"؟ أم هل يمكن أن يكون علماء الفيزياء قد شيدوا صياغة غاية في الغرابة لميكانيكا الكم، صياغة على الرغم من نجاحها الكمي إلا أنها قد أربكت طبيعة الواقع الحقيقية؟ لا أحد يعرف. ربما يأتي في المستقبل بعد فترة من الزمن شخص ماهر ليصل إلى صياغة جديدة تجيب إجابة شافية عن كل التساؤلات التي تبدأ بلماذا وماذا في ميكانيكا الكم. ومرة ثانية، قد لا يحدث ذلك. والشيء الوحيد الذي نعرفه بالتأكيد هو أن ميكانيكا الكم تبين لنا بشكل مطلق لا جدال فيه أن عدداً من المفاهيم الأساسية الضرورية لفهم عالمنا اليومي المألوف تفشل في تقديم أي تفسير عندما نستخدمها ونركز على العالم المجهري. ونتيجة لذلك، لابد من تعديل كل من لغتنا ومنطقنا بشكل كبير عندما نحاول فهم وتفسير العالم على المستويات الذرية وتحت الذرية.

وسنقوم في المقاطع القادمة بتطوير أسس هذه اللغة ونصف عدداً مما تحتويه من مفاجآت ملحوظة. فإذا بدت لك ميكانيكا الكم وكأنها أمر شاذ أو حتى مضحك فلا بد من أن تأخذ في اعتبارك أمرين اثنين. الأول، فوق حقيقة أنها

نظرية رياضية متماسكة، فإن السبب الوحيد وراء اعتقادنا في ميكانيكا الكم هو أنها توصلت إلى تنبؤات تم التحقق منها بدرجة فائقة الدقة. فإذا استطاع شخص ما أن يذكر لك تفاصيل دقيقة وغزيرة عن طفولتك، فمن الصعب ألا تعتقد أنه من أقربائك الذين فارقتهم من زمن بعيد. الثاني، أنك لست وحدك الذي له رد الفعل هذا بالنسبة لميكانيكا الكم. وهي وجهة نظر يتبناها بدرجة أو بأخرى بعض الفيزيائيين الموقرين في جميع العصور. وقد رفض آينشتاين تقبل ميكانيكا الكم ككل. بل حتى نيلز بوهر، وهو أحد الرواد الأساسيين لنظرية الكم وواحد من أقوى المؤيدين لها، قال مرة، إنه إذا لم تشعر بدوار أحياناً أثناء تفكيرك في ميكانيكا الكم، فمعنى ذلك أنك في الواقع لم تفهمها.

ثانياً: الجو ساخن جداً في المطبخ

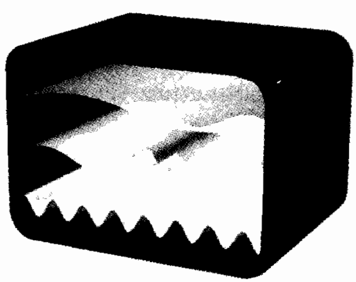
بدأ الطريق إلى ميكانيكا الكم بمشكلة مربكة. فتخيل أن الفرن الذي تملكه في بيتك معزول عزلاً جيداً، وأنك قد ضبطته على درجة حرارة معينة، ولتكن 400 فهرنهايت، ثم تركته كذلك وقتاً كافياً ليسخن. عندما تسخن جدران الفرن ستتولد موجات إشعاعية بداخله حتى لو كنت قد فرغت الهواء منه قبل أن تبدأ في تسخينه. وهي نفس نوع الإشعاعات - الحرارة والضوء على شكل موجات كهرومغناطيسية - التي تنبعث من سطح الشمس، أو من قطعة حديد ساخنة متوهجة.

والمشكلة هنا أن الموجات الكهرومغناطيسية تحمل طاقة - فمثلاً، تعتمد الحياة على الأرض كلية على الطاقة الشمسية التي تنتقل من الشمس إلى الأرض بواسطة الموجات الكهرومغناطيسية. وقد قام علماء الفيزياء في بداية القرن العشرين بحساب الطاقة الكلية التي يحملها الإشعاع الكهرومغناطيسي داخل فرن مسخن إلى درجة معينة. وباستخدام خطوات حسابية معروفة ومقبولة بشكل جيد، توصلوا إلى نتيجة غير مقبولة ومضحكة مؤداها: أن الطاقة الكلية داخل الفرن لانهائية عند أي درجة حرارة نختارها.

كان واضحاً للجميع أن الأمر هراء - فالفرن الساخن يمكن أن يتضمن كمية معقولة من الطاقة، لكن بالتأكيد ليست كمية لانهائية. وحتى نفهم الحل الذي اقترحه بلانك فإن المشكلة تستحق أن نفهمها بقدر أكبر من التفاصيل. ويتضح أنه عند تطبيق نظرية ماكسويل الكهرومغناطيسية على الإشعاع داخل فرن فإن الموجات المتولدة من الجدران الساخنة لابد أن يكون لها "عدد صحيح" من القمم ومن المنخفضات التي تتناسب تماماً مع المسافة بين الأسطح المتقابلة. ويبين الشكل

رقم (4-1) بعض الأمثلة على ذلك. يستخدم الفيزيائيون ثلاثة مصطلحات لوصف هذه الموجات: طول الموجة والتردد والسعة. وطول موجة هو المسافة بين قمتين متتاليتين أو منخفضين متتاليين للموجات كما هو مصور في الشكل رقم (4-2). وكلما زاد عدد القمم والمنخفضات قصر طول الموجة، حيث إنها جميعا لابد من أن تنحشر في المسافة بين جدران الفرن الثابتة. والتردد هو عدد الدورات إلى أعلى وإلى أسفل التي تكملها الموجة في الثانية الواحدة. ويتبين أن طول الموجة يتحدد بالتردد والعكس صحيح: فأطوال الموجات الأكبر تعني تردداً أقل؛ وأطوال الموجات الأقصر تعني تردداً أكبر. ولتعرف السبب، فكر في ما يحدث عندما تولد موجات بأن تهز حبلاً طويلاً مربوطاً من أحد طرفيه. ولتوليد موجة طويلة تهز الحبل برقة من الطرف الموجود في يدك لأعلى ولأسفل. ويكون تردد الموجات في هذه الحالة مطابقاً لعدد الدورات التي تتمها حركة يدك في الثانية، وهو منخفض بالتالي. ولكي تولد موجات قصيرة عليك أن تهز يدك بصورة أكثر عنفاً - أي عدداً أكبر من الهزات - وينتج من ذلك موجات ذات ترددات أعلى. وأخيراً يستخدم الفيزيائيون مصطلح السعة لوصف أقصى ارتفاع أو أقصى عمق للموجة كما هو مصور في الشكل رقم (4-2).

الشكل رقم (4-1)

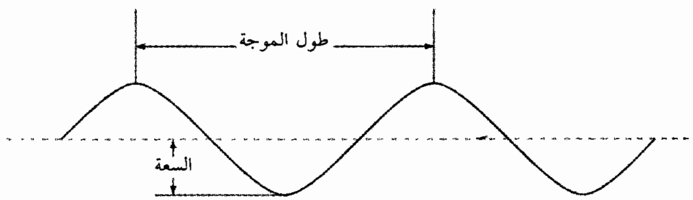


تنبئنا نظرية ماكسويل أن الموجات الإشعاعية في الفرن تمتلك عدداً صحيحاً من القمم والمنخفضات - لتتناسب بالضبط مع دورات الموجة.

وإذا كنت تجد أن الموجات الكهرومغناطيسية أمر مجرد بعض الشيء، فهناك تشبيه جيد آخر يستحق أن تحفظه في ذهنك، وهو الموجات التي تنتج من نقر وتر في كمان. وتقابل الترددات المختلفة نغمات موسيقية مختلفة: فكلما كان التردد أعلى كانت النغمة أعلى. وسعة الموجة على وتر الكمان تعتمد على القوة التي

يهتز بها الوتر. فإذا كانت الضربة قوية كانت الطاقة الممنوحة لاضطراب الموجة أكبر، وتقابل الطاقة الأعلى سعة أكبر للموجة. ويمكنك سماع ذلك عندما تكون النغمة أعلى صوتاً. وبنفس الطريقة فإن الطاقة الأقل تقابل سعة أقل وصوتاً أكثر خفوتاً.

الشكل رقم (2-4)



طول الموجة هو المسافة بين قمتين متتاليتين أو منخفضين متتاليين للموجة. أما السعة فهي أقصى ارتفاع وأقصى انخفاض للموجة.

وباستخدام الديناميكا الحرارية (الثرموديناميكا Thermodynamics) الخاصة بالقرن التاسع عشر تمكن الفيزيائيون من تحديد كمية الطاقة التي يمكن أن تضخها جدران الفرن الساخنة في الموجات الكهرومغناطيسية بكل أطوالها المسموح بها - بمعنى القوة التي "تضرب" بها الجدران كل موجة فعلياً. وكانت النتيجة التي وجدوها بسيطة تحمل كل الموجات المسموح بها - من دون النظر لطولها - نفس كمية الطاقة (تتحدد الكمية بالضبط بدرجة حرارة الفرن). وبمعنى آخر، فإن كل أنساق الموجات الممكنة داخل الفرن تقف على قدم المساواة تماماً من حيث كمية الطاقة المتضمنة فيها.

وتبدو هذه النتيجة لافتة للانتباه لأول وهلة ولو أنها نتيجة حميدة غير ضارة. لكن ليس الأمر كذلك. إنها تنعي سقوط ما أصبح اليوم معروفاً باسم الفيزياء الكلاسيكية. ويكمن السبب في الآتي: على الرغم من أن شرط وجود عدد صحيح من القمم والمنخفضات يؤدي إلى استبعاد أنساق عديدة متباينة من الموجات التي يمكن تصورها في الفرن، لكن ما زالت هناك أعداد لا نهائية من هذه الموجات التي لها قمم ومنخفضات متزايدة. وحيث أن كل نسق من الموجات يحمل نفس الكمية من الطاقة، فإن ذلك يعني وجود كمية لا نهائية من الطاقة. وعلى مفرق القرنين التاسع عشر والعشرين كان هناك خلل خطير.

ثالثاً: صناعة القطع عند مفترق القرن

توصل بلانك سنة 1900 إلى استنتاج مفعم بالحماس، سمح بإيجاد وسيلة للخروج من هذا المأزق مما جعله يحصل على جائزة نوبل في الفيزياء سنة 1918[2]. وحتى تدرك هذه النتيجة تخيل أنك وجمهرة كبيرة من الناس - عدد لا نهائي - قد انحشرتم في مخزن كبير بارد يشرف عليه مالكه البخيل. وعلى الحائط يوجد ثرموستات (منظم لدرجة الحرارة) رقمي هائل يتحكم في درجة الحرارة، لكنك ستصعق عندما تكتشف قيمة ما هو مطلوب دفعه للمالك من أجل التسخين: فإذا كان الثرموستات مضبوطاً عند درجة 50 فهرنهايت، فعلى كل فرد أن يدفع للمالك 50 دولاراً. وإذا كان مضبوطاً عند درجة 55 فالمطلوب من كل فرد 55 دولاراً، وهكذا. وستتيقن أن المالك سيربح كمية لا نهائية من النقود لمجرد تسخين المكان لأي درجة حرارة حيث أنك تتشارك في المخزن مع عدد لا نهائي من رفاقك.

لكنك إذا تمعنت في قواعد المالك لشروط الدفع فستجد بعض الثغرات. فلا يود المالك أن يرجع باقي النقود لمن له باقٍ، وخاصة أن عدد القاطنين لا نهائي، ولأنه مشغول جداً. لذلك فقد عقد ميثاق شرف معهم. فمن يملك القيمة المطلوبة بالضبط، فليفعل ذلك، وإلاّ فإنهم سيدفعون أكبر فئة عملة لا تستحق رد الباقي. وهكذا، ولكونك ترغب أن يشارك الجميع وفي نفس الوقت تتجنب الزيادة الهائلة في سعر التسخين، فإنك ستجبر رفاقك على تنظيم ما يملكونه بالطريقة الآتية: يحمل أحد الأفراد كل العملة فئة البنس، ويحمل آخر كل العملة فئة الخمس بنسات، وثالث يحمل كل العملة فئة العشر بنسات، ورابع يحمل كل العملة فئة ربع دولار، وهكذا مروراً بفئة الدولار والخمسة دولارات والعشرة والعشرين والخمسين والمائة والألف وحتى الفئات الأكبر (وغير المألوفة). وستضبط الثرموستات عند درجة 80 فهرنهايت بكل صفاقة وتنتظر وصول المالك. وعندما يصل فإن من يحمل البنسات سيدفع 8000 قطعة، ومن يحمل الخمس بنسات سيدفع 1600 قطعة، ومن يحمل العشر بنسات سيدفع 800 قطعة، ومن يحمل

---

(2) على الرغم من أن أبحاث بلانك قد أوجدت حلاً لمعضلة الطاقة اللانهائية، إلا أن ذلك فيما يبدو لم يكن هو الهدف الذي دفعه للقيام بهذه الأبحاث. وبالأحرى كان بلانك يحاول فهم موضوع له علاقة وطيدة بذلك: وهي النتائج التجريبية المتعلقة بتوزيع طاقة الفرن - "جسم أسود" بلغة أكثر دقة - على مختلف أطوال الموجات. وللاطلاع على تفاصيل أكثر لتاريخ هذا التطور، فإن القارئ المهتم يمكنه قراءة: Thomas S. Kuhn, *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894-1912* (Oxford: Clarendon Press; New York: Oxford University Press, 1978).

عملة الربع دولار سيدفع 320 قطعة، ومن يحمل فئة الدولار سيدفع 80 دولاراً، ومن يحمل فئة الخمسة دولارات سيدفع 16 ورقة، ومن يحمل فئة العشرة دولارات سيعطيه ثماني ورقات، والشخص الذي يحمل فئة العشرين دولاراً سيعطيه أربع ورقات، أما من يحمل فئة الخمسين دولاراً فسيعطيه ورقة واحدة (حيث أن ورقتين من فئة 50 دولاراً ستتعدى المطلوب دفعه وبالتالي تتطلب رد الباقي). وكل من عدا ذلك يحمل فقط قطعة نقود حدّاً أدنى تتجاوز المبلغ المطلوب دفعه. وهكذا، فبدلاً من أن يحصل المالك على كمية لا نهائية من النقود كان يتوقعها، فإنه سيرحل بمبلغ تافه مجموعه 690 دولاراً فقط.

استخدم بلانك استراتيجية مشابهة ليخفض من النتيجة غير المعقولة للطاقة اللانهائية داخل الفرن إلى أخرى محددة. وإليكم كيف تم ذلك. ضمن بلانك بجسارة أن الطاقة التي تحملها الموجة الكهرومغناطيسية في الفرن تأتي في قطع مثل فئات العملة. ويمكن للطاقة أن تكون فئة معينة أساسية "فئات طاقة" أو ضعفها أو ثلاثة أمثالها، وهكذا. وبالضبط، كما أنك لا تستطيع الحصول على ثلث بنس أو ربعين ونصف الربع من الدولار، فإن بلانك قد أعلن أنه عند الحديث عن الطاقة من غير المسموح به استخدام الكسور. وتتحدد فئات العملة بواسطة وزارة الخزانة في الولايات المتحدة. وللبحث عن تفسير أساسي أكثر اقترح بلانك أن فئة طاقة الموجة تتحدد بتردد الموجة - والفئة هي أقل قطعة طاقة يمكن أن تتواجد. وقد افترض بلانك بصفة خاصة أن الحد الأدنى لطاقة الموجة يتناسب طردياً مع ترددها: يفرض التردد الأكبر (طول موجة أقصر) حداً أدنى أكبر من الطاقة، ويفرض التردد الأصغر (طول موجة أطول) حداً أدنى أصغر من الطاقة. وبشيء من التبسيط، مثل موجات المحيط عندما يكون هادئاً فإنها تكون أطول وأهدأ، أما تلك الجياشة فإنها تكون أقصر ومتلاطمة، كذلك الموجات الأطول من الإشعاع أقل طاقة ذاتية من تلك الموجات الإشعاعية الأقصر.

وهنا مربط الفرس: فقد أظهرت حسابات بلانك أن وجود الطاقة المسموح بها على شكل كتل أو قطع في كل موجة قد عالج النتيجة غير المعقولة السابقة للطاقة الكلية اللانهائية. وليس من الصعب إدراك السبب في ذلك. فعند تسخين فرن إلى درجة حرارة معينة، تتنبأ حسابات الديناميكا الحرارية من القرن التاسع عشر بالطاقة العامة التي من المفترض أن تشارك بها كل موجة في الطاقة الكلية. لكن مثل هؤلاء الرفاق الذين لم يدفعوا نصيبهم في المبلغ العام المطلوب أن يدفعه كل فرد للمالك لأن فئة العملة التي يحملونها أكبر من المطلوب، كذلك إذا كان الحد الأدنى لطاقة موجة معينة يتجاوز الطاقة التي من المفترض أن تساهم

بها، فإنها لن تساهم وستظل ساكنة. وحيث أنه تبعاً لبلانك فإن الحد الأدنى للطاقة التي تحملها الموجة يتناسب طردياً مع ترددها، فإننا عندما نفحص الموجات ذات الترددات الأعلى (طول الموجة الأقصر) فإننا آجلاً أو عاجلاً سنجد أن الحد الأدنى للطاقة التي تحملها أكبر من المتوقع أن تشارك به. ومثل الرفاق الذين كانوا يحملون عملة من فئات أكبر من 50 دولاراً، فإن الموجات ذات الترددات العالية لن تستطيع أن تشارك في كمية الطاقة التي تتطلبها قواعد فيزياء القرن التاسع عشر. وهكذا تماماً مثلما أن المشاركين في دفع حساب التدفئة هم عدد محدود من الرفاق - الأمر الذي يؤدي إلى كمية محدودة من النقود - فإن عدداً محدوداً من الموجات هي التي تتمكن من المشاركة في طاقة الفرن الكلية - ومرة أخرى يؤدي ذلك إلى كمية محدودة من الطاقة. وسواء كان الأمر يتعلق بالطاقة أو بالنقود فإن عملية تجميع الوحدات الأساسية في قطع و تزايد حجم هذه القطع كلما زاد التردد أو فئة العملة يغير من الإجابة من ما لا نهاية إلى شيء محدود[3].

وقد قام بلانك بخطوة هامة عندما استغنى عن البيان الذي لا معنى له حول الناتج اللانهائي. والذي جعل الناس يصدقون أن تخميناته منطقية هو أن هذه الإجابة المحدودة التي أوجدتها طريقته الجديدة حول طاقة الفرن قد تطابقت بشكل رائع مع القياسات التجريبية. وعلى وجه التحديد، وجد بلانك أنه إذا تحكم في أحد العوامل التي تدخل في حساباته الجديدة فإنه يستطيع أن يتنبأ بدقة بكمية الطاقة المقيسة للفرن عند أية درجة حرارة. كان هذا العامل بالذات هو معامل التناسب بين تردد الموجة وقطعة الحد الأدنى من الطاقة التي تملكها الموجة. وقد وجد بلانك أن معامل التناسب هذا - المعروف الآن بثابت بلانك ويرمز له بالرمز $\hbar$ (وتنطق إتش بار) - حوالى جزء من المليار من جزء من المليار من جزء من المليار من الوحدات اليومية[4]. وتدل القيمة الضئيلة لثابت بلانك على أن حجم قطع الطاقة عادة ما يكون صغيراً جداً. وهذا هو السبب في ما يبدو مثلاً أننا نستطيع أن نغير من طاقة الموجة على وتر الكمان - وبالتالي درجة ارتفاع الصوت بصورة مستمرة. وفي الواقع، على الرغم من أن طاقة الموجة تمر بخطوات محدودة، على طريقة بلانك، إلا أن حجم هذه الخطوات من الصغر بحيث أن القفزات المحددة من مستوى معين لارتفاع الصوت إلى مستوى آخر يبدو كأنه يتم

(3) وبشكل أكثر دقة، بيّن بلانك أن الموجات ذات محتوى الطاقة الدنيا الذي يتجاوز متوسط المساهمة الظاهرية (طبقاً للديناميكا الحرارية من القرن التاسع عشر) يتم إخمادها أُسّيًا. ويتزايد هذا الإخماد بحدة عند فحصنا لموجات ذات تردد أعلى.

(4) ثابت بلانك يساوي 1.05×10^{-27} *grams, centimeter*^{2}/second.

بنعومة (وليس عن طريق قفزات). وتبعاً لتأكيدات بلانك فإن حجم هذه القفزات في الطاقة يزداد كلما ازداد تردد الموجات (بينما تصبح أطوال الموجات أقصر وأقصر). وهذه هي المكونات الأساسية التي تحل تناقض الطاقة اللانهائية.

وكما سنرى، فإن فرضية الكم لبلانك تقدم ما هو أكثر كثيراً من مجرد فهم محتوى طاقة الفرن. فهي تقلب الكثير من المفاهيم عن العالم الذي اعتقدنا لفترة أنه مستقر. ويتضمن صغر قيمة $\hbar$ معظم هذه الابتعادات الجذرية من الحياة العادية في اتجاه العالم الميكروسكوبي، لكن لو كانت قيمة $\hbar$ أكبر كثيراً مما هي عليه، فإن الحادث الغريب الذي وقع في الحانة سيكون من الأمور العادية. وكما سنرى، فإن نظائرها المجهرية ستكون بالتأكيد عادية.

رابعاً: ما هي تلك القطع؟

لم يكن لدى بلانك سبب منطقي لإدخال المفهوم المحوري حول قطع الطاقة. وبجانب حقيقة كونها ملائمة، فإنه لا هو ولا أي شخص آخر يستطيع أن يقدم أسباباً مقنعة للذي جعلها أمراً حقيقياً. وكما قال عالم الفيزياء جورج غامو، يشبه الأمر كما لو أن الطبيعة تسمح للفرد بأن يشرب كوباً كاملاً من البيرة أو لا بيرة على الإطلاق، ولا شيء بينهما[5]. وفي 1905، وجد آينشتاين تفسيراً لذلك، الأمر الذي استحق عليه جائزة نوبل في الفيزياء سنة 1921.

توصل آينشتاين إلى تفسيره بالتفكير حول ما كان معروفاً باسم الظاهرة الكهروضوئية. كان عالم الفيزياء الألماني هنريش هيرتز أول من اكتشف أن الإشعاعات الكهرومغناطيسية - الضوء - عندما تسقط على فلزات معينة تنبعث منها إلكترونات، وذلك سنة 1887. وليس هذا بالشيء الغريب. فللفلزات خاصية أن بعض إلكتروناتها ترتبط ارتباطاً ضعيفاً داخل الذرات (ولذلك فهي موصلات جيدة للكهرباء). فعندما يصطدم الضوء بسطح الفلز فإنه يفقد جزءاً من طاقته، كما في حالة سقوط الضوء على جلدك مسبباً شعورك بالدفء. ويستطيع انتقال الطاقة هذا أن يسبب اضطراباً للإلكترونات في الفلز، الأمر الذي يؤدي إلى مغادرة بعض الإلكترونات ضعيفة الارتباط بعيداً عن السطح.

غير أنه ستتضح تلك الصفات الغريبة للظاهرة الكهروضوئية عند دراسة خواص الإلكترونات المنطلقة من سطح الفلز بالتفصيل. ولأول وهلة قد تظن انه كلما زادت شدة الضوء - سطوعه - فإن سرعة الإلكترونات المنطلقة ستزداد هي

(5) Timothy Ferris, *Coming of Age in the Milky Way* (New York: Anchor Books, 1989), p. 286.

الأخرى، حيث أن الموجات الكهرومغناطيسية الساقطة طاقتها أعلى. غير أن ذلك لا يحدث. لكن سيزداد عدد الإلكترونات المنطلقة بينما تظل سرعتها ثابتة. ومن جهة أخرى، فقد لوحظ تجريبياً أن سرعة الإلكترونات المنطلقة تزداد بزيادة تردد الضوء الساقط. وبنفس الطريقة تقل سرعتها إذا انخفض تردد الضوء. (بالنسبة للموجات الكهرومغناطيسية في الجزء المرئي من الطيف، فإن زيادة التردد يقابلها تغير في اللون من الأحمر إلى البرتقالي إلى الأصفر إلى الأخضر إلى الأزرق إلى النيلي وأخيراً البنفسجي. والترددات الأعلى من البنفسجية ليست مرئية وتقابل الأشعة فوق البنفسجية، وتأتي بعدها الأشعة السينية [X]، أما الترددات الأقل من الترددات الحمراء فإنها أيضاً ليست مرئية وتقابل الأشعة تحت الحمراء). وفي الحقيقة كلما قل تردد الضوء المستخدم سنصل إلى نقطة تهبط فيها سرعة الإلكترونات المنبثقة إلى الصفر وتتوقف عملية بثها من السطح، بصرف النظر عن شدة الضوء المبهر المنبعث من المصدر. ولأسباب غير معروفة، فإن لون شعاع الضوء الساقط - وليس طاقته الكلية - هو الذي يتحكم في ما إذا كانت الإلكترونات ستبث من السطح أم لا، كما أنه يتحكم كذلك في طاقة هذه الإلكترونات إذا انبعثت.

ولإدراك الكيفية التي فسر بها آينشتاين هذه الحقائق المحيرة، فلنرجع مرة أخرى إلى موضوع المخزن، والذي تمت تدفئته إلى درجة 80 فهرنهايت. وتخيل أن المالك الذي يكره الأطفال قد طلب من كل من هو تحت 15 سنة أن يقيم في بدروم المخزن، والذي يمكن للبالغين أن يروه من شرفة كبيرة تحيط بالمخزن. وفوق ذلك، فإن الوسيلة الوحيدة لأي أحد من هذا العدد الهائل من الأطفال أن يغادر بدروم المخزن هو أن يدفع للحارس 85 سنتاً هي تسعيرة الخروج. (هذا المالك شخص رهيب!) وقد نسق البالغون بناءً على إلحاح منك الطريقة الجماعية باستخدام فئات العملة كما سبق أن وصفنا وذلك لإعطاء النقود للأطفال عن طريق إلقائها إليهم من الشرفة. ولنر ماذا سيحدث.

يبدأ الشخص الحامل لفئة البنسات في إلقائها، إلا أن هذا من الضآلة بحيث لا يمكن لأي طفل أن يجمع تكلفة المغادرة. ولأن هناك عدداً لانهائياً من الأطفال، وكلهم يحارب بضراوة في خضم متلاطم للحصول على النقود المتساقطة، فحتى لو أسقط حامل البنسات كمية هائلة منها فلن يستطيع أي طفل أن يجمع مبلغ 85 سنتاً المطلوب دفعها للحارس. وينطبق نفس الشيء على البالغين الذين يحملون العملة فئة الخمسة بنسات والعشرة بنسات وأرباع الدولار. ومع أن كل واحد من حاملي العملة يلقي كميات كبيرة من النقود، فإن أي طفل سيكون محظوظاً لو تمكن من الحصول على قطعة عملة واحدة (لا يستطيع

معظمهم الحصول على أي شيء) ومن المؤكد، لن يتمكن أي طفل من جمع مبلغ 85 سنتاً المطلوبة للمغادرة. لكن عندما يبدأ حاملو فئة الدولار في إلقائها - وحتى لو كانت الكمية التي يلقيها صغيرة مقارنة بالآخرين حيث يلقي دولاراً واحداً كل مرة، فسيتمكن الأطفال المحظوظون الذين سيلتقطون عملة الدولار الواحد من المغادرة فوراً. وتجدر ملاحظة أنه حتى ولو أُصيب هذا الإنسان البالغ حامل عملة الدولار بنوبة كرم وألقى كمية كبيرة من الدولارات، فإن أعداد الأطفال الذين سيتمكنون من المغادرة ستزيد بشدة، لكن كل واحد منهم سيكون قد ترك مبلغ 15 سنتاً للحارس. وهذه حقيقة واقعة بصرف النظر عن العدد الكلي للدولارات الملقاة.

وهنا سنرى العلاقة بين ما ذكرناه والظاهرة الكهروضوئية. اقترح آينشتاين إدخال صورة القطع التي جاء بهَا بلانك لطاقة الموجات في وصف جديد للضوء معتمداً على البيانات التجريبية المذكورة أعلاه. وتبعاً لآينشتاين فإنه يجب أن ننظر إلى شعاع الضوء على أنه تيار من الحزم الدقيقة - جسيمات دقيقة للضوء - والتي أطلق عليها الكيميائي جلبرت لويس اسم "فوتونات" (وقد استخدمنا هذه الفكرة في مثال الساعة الضوئية في الفصل الثاني). وللإحساس بالقياس المستخدم، ووفقاً لهذه الرؤية حول سلبية الضوء المكون من جسيمات، فإن مصباحاً قدرته 100 وات يبعث بمائة مليار مليار فوتون (10^{20}) في الثانية. وقد استخدم آينشتاين هذا المفهوم ليقترح الآلية المجهرية وراء الظاهرة المجهرية: سينطلق الإلكترون من سطح الفلز إذا صدمه فوتون ذو طاقة كافية. لكن ما الذي يحدد طاقة كل فوتون على حدة؟ وقد اتبع آينشتاين طريق بلانك في تفسيره للنتائج التجريبية، واقترح أن طاقة كل فوتون تتناسب طردياً مع تردد موجة الضوء (ومعامل التناسب هو ثابت بلانك).

ومثل الحد الأدنى لتكلفة مغادرة الأطفال، فإن الإلكترونات في الفلز لابد أن يصدمها فوتون له حد أدنى من الطاقة حتى يتمكن من مغادرة السطح. (ومثل الأطفال الذين يناضلون للحصول على النقود فإنه من غير المحتمل تماماً أن يصطدم إلكترون واحد بأكثر من فوتون - بل إن معظمهم لن يصطدم بأي فوتون). لكن إذا كان تردد الفوتونات الساقطة صغيراً جداً، فإن فوتوناتها لا تملك القوة اللازمة لطرد الإلكترونات. تماماً كما أنه لا يستطيع أي طفل المغادرة حتى مع الكمية الهائلة الملقاة عليهم من النقود، كذلك لن يتمكن الإلكترون من المغادرة الحرة بصرف النظر عن الطاقة الكلية الهائلة المصاحبة لشعاع الضوء الساقط إذا كان ترددها ضئيلاً جداً (وكذلك طاقة كل فوتون).

وتماماً مثل ما حدث للأطفال حيث تمكنوا من مغادرة المخزن عندما

تساقطت فئات من العملة الكبيرة كفاية، فإن الإلكترونات هي الأخرى ستغادر السطح عندما يصبح تردد الضوء الساقط عليها عالياً بما فيه الكفاية - أي فئة الطاقة. وعلاوة على ذلك، وكما في حالة الإنسان البالغ حامل الدولارات، عندما يزيد من كمية النقود الملقاة للأطفال بزيادة عدد الدولارات، فإن الشدة الكلية لشعاع ضوء ذي تردد معين ستزيد بزيادة عدد الفوتونات التي يحتويها الشعاع. وكما أن المزيد من الدولارات سيجعل المزيد من الأطفال قادرين على المغادرة، فإن العدد الأكبر من الفوتونات سيتسبب في زيادة عدد الإلكترونات التي ستصطدم وتتحرر من سطح الفلز. وتجدر ملاحظة أن كمية الطاقة المتبقية مع كل إلكترون منبعث بعد تركه السطح تعتمد كلية على طاقة الفوتون الذي اصطدم به - التي بدورها تتحدد بتردد شعاع الضوء وليس بشدته الكلية. تماماً كما يغادر الأطفال البدروم وكل واحد منهم قد ترك 15 سنتاً بصرف النظر عن عدد الدولارات الملقاة إليهم، فإن كل إلكترون يغادر السطح وله نفس الطاقة - وبالتالي له نفس السرعة - بغض النظر عن الشدة الكلية للضوء الساقط. والمزيد من النقود يعني ببساطة أن المزيد من الأطفال سيتمكن من المغادرة، كذلك المزيد من الطاقة الكلية لشعاع الضوء يعني ببساطة مزيداً من الإلكترونات ستتحرر. فإذا أردنا أن يغادر الأطفال البدروم ومعهم مزيد من النقود علينا أن نرفع فئة العملة الملقاة إليهم، وبالمثل إذا أردنا أن تغادر الإلكترونات السطح بسرعة أعلى فلا بد من زيادة تردد شعاع الضوء الساقط - أي، أننا لابد من أن نرفع فئة الطاقة للفوتونات التي تسقط على سطح الفلز.

ويتطابق ذلك تماماً مع البيانات التجريبية. ويُحدِّد تردد الضوء (لونه) سرعة الإلكترونات المنبعثة، بينما تحدِّد شدة الضوء الكلية عدد الإلكترونات المنبعثة. وهكذا بين آينشتاين أن استنتاجات بلانك حول قطع الطاقة تعكس، في الحقيقة، سمة أساسية للموجات الكهرومغناطيسية: فهي تتكون من جسيمات - فوتونات - وهي على شكل حزم صغيرة أو "كوانتا" من الضوء. والسبب في تقطيع الطاقة المصاحبة لهذه الموجات أنها هي في الأصل مكونة من قطع.

وقد مثلت وجهة نظر آينشتاين تقدماً عظيماً. لكن، وكما سنرى، فإن القصة ليست بهذه الصورة الجيدة التي تبدو عليها.

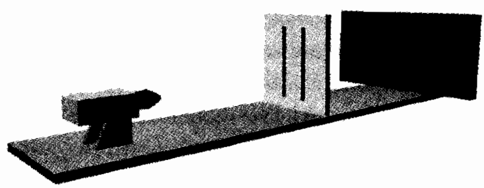
خامساً: هل هي موجة أم جسيمة؟

يعلم الجميع أن الماء - وبالتالي موجات الماء - تتكون من عدد هائل من الجزيئات. ولذا هل هو أمر غريب حقاً أن تتكون موجات الضوء من عدد هائل من الجسيمات هي الأخرى، وبالتحديد من الفوتونات؟ نعم، الأمر كذلك. لكن

الغرابة تأتي في التفاصيل. وكما نرى، فإن نيوتن قد أعلن منذ أكثر من ثلاثمائة سنة مضت أن الضوء يتكون من تيار من الجسيمات. ولذا فالفكرة ليست بجديدة. غير أن بعض أقران نيوتن، ومنهم الفيزيائي الهولندي المرموق كريستيان هيوغينز، لم يتفقوا معه في هذا الرأي بل إن هيوغينز أعلن أن الضوء عبارة عن موجات. احتدم الجدل، لكن في النهاية حسمته تجارب عالم الفيزياء الإنكليزي توماس يونغ في أوائل القرن التاسع عشر التي بينت أن نيوتن كان على خطأ.

ويوضح الشكل رقم (4-3) أحد نماذج تجارب يونغ - المعروفة بتجربة الشق الطولي المزدوج. كان فينمان مغرماً بالقول إن ميكانيكا الكم يمكن أن تُدْرَك من خلال التفكير بعناية في تطبيقات هذه التجربة الفريدة. وهي جديرة بالمناقشة. وكما نرى في الشكل رقم (4-3) فإن الضوء يسقط على حاجز رقيق به شقان طوليان. وهناك لوح فوتوغرافي يسجل الضوء الذي يمر من الشقين. وتبين المساحات الأكثر سطوعاً على اللوح سقوط ضوء أكثر. وتتلخص التجربة في مقارنة الصور على الألواح الفوتوغرافية والناتجة عندما يكون أحد أو كلا الشقين في الحاجز مفتوحاً ومصدر الضوء مشتعلاً.

الشكل رقم (4-3)

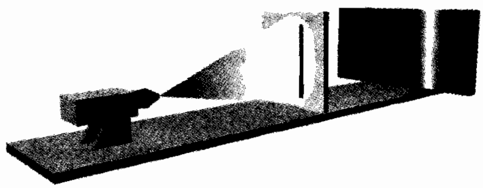


في تجربة الشق المزدوج، يسقط شعاع الضوء على حاجز به شقان طوليان. ويسجل الضوء الذي يمر من خلال الحاجز على لوح فوتوغرافي، عندما يكون أحد الشقين أو كلاهما مفتوحاً.

إذا كان الشق الأيسر مغلقاً والأيمن مفتوحاً، فإن الصورة ستظهر كما في الشكل رقم (4-4). وهو أمرٌ مقبول حيث إن الضوء الذي سيقع على اللوح الفوتوغرافي لا بد من أن يمرَّ خلال الشق المفتوح فقط، ولذلك سيتركز حول الجانب الأيمن من اللوح الفوتوغرافي. وبالمثل إذا أغلقنا الشق الأيمن وتركنا الأيسر مفتوحاً، فإن الصورة ستظهر كما في الشكل رقم (4-5). أما إذا ترك الشقان مفتوحين فإن فكرة نيوتن عن طبيعة الضوء كجسيمات ستؤدي إلى توقع

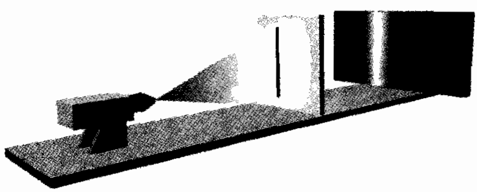
صورة اللوح الفوتوغرافي كما يظهر في الشكل رقم (4-6)، وهو مزيج من الشكلين رقمي (4-4) و(4-5).

الشكل رقم (4-4)



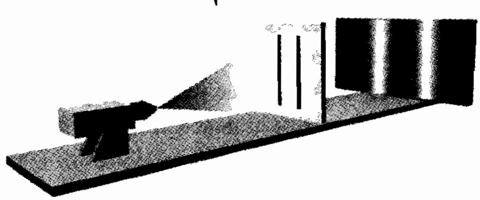
عندما يكون الشق الأيمن مفتوحاً في هذه التجربة يؤدي إلى الصورة المبنية على اللوح الفوتوغرافي.

الشكل رقم (4-5)



كما في الشكل رقم (4-4) بالضبط، إلاَّ أن الشق الأيسر هو المفتوح هنا.

الشكل رقم (4-6)



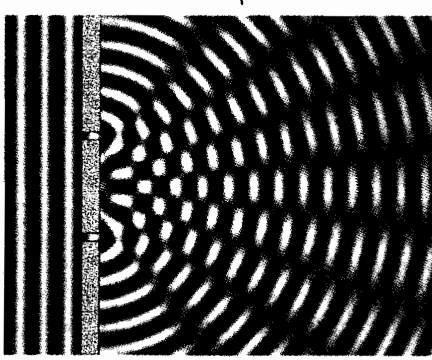
فكرة نيوتن عن طبيعة الضوء كجسيمات تؤدي إلى أنه إذا كان الشقان مفتوحين فإن ما سيظهر على اللوح الفوتوغرافي هو مزج الشكلين رقمي (4-4) و(4-5).

في الواقع، لو فكرت في جسيمات نيوتن للضوء على أنها كريات صغيرة تطلقها في اتجاه الحائط، فإن ما سينفذ منها سيتركز في المنطقتين على امتداد

الشقين الطوليين. وفي حالة ما إذا كانت طبيعة الضوء موجية، فإن ذلك سيؤدي إلى توقع مختلف جداً لما سيحدث عندما يكون الشقان مفتوحين. ولنرَ ما سيحدث.

تصور لوهلة أننا سنتعامل مع موجات الماء بدلاً من موجات الضوء. فسنحصل على نفس النتيجة، غير أن الماء أسهل عندما نفكر في الأمر. فعندما تصطدم موجات الماء بالحاجز فإن موجات دائرية ستنفذ من كل شق طولي، في صورة تشبه كثيراً ما يحدث عند إلقاء حصاة في بركة، كما هو موضح في الشكل رقم (4-7). (ويمكن محاولة إجراء هذه التجربة ببساطة باستخدام حاجز من الورق المقوى به شقان في وعاء به ماء). وعندما تتداخل الموجات النافذة من الشقين بعضها مع بعض سيحدث شيء مثير للاهتمام تماماً. فإذا التقت قمتان لموجتين الواحدة مع الآخرى فإن ارتفاع موجة الماء عند هذه النقطة سيزداد مساوياً لمجموع ارتفاع قمتي الموجتين. أما إذا التقى قاعا موجتين، فإن عمق انخفاض الماء عند هذه النقطة سيزداد بنفس الطريقة. وفي النهاية، إذا التقت قمة موجة نافذة من أحد الشقين مع قاع موجة نافذة من الشق الآخر فإنهما سيتلاشيان. (في الحقيقة، تكمن هذه الفكرة وراء التخلص من الضجيج في سماعات الرأس - يتم قياس شكل موجة الصوت القادم ثم ينتج موجة أخرى لها نفس الشكل و"مضادة" تماماً مما يؤدي إلى تلاشي الصوت غير المرغوب فيه). وفي ما بين هذه التداخلات القصوى - القمم مع القمم، والانخفاضات مع الانخفاضات، والقمم

الشكل رقم (4-7)

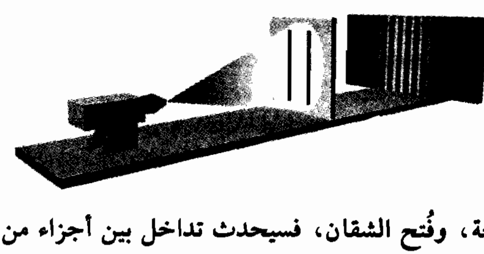


موجات الماء الدائرية التي تنفذ من كل شق طولي ويتداخل مع بعضها مسببة زيادة في ارتفاع الموجات في بعض المواقع وانخفاضها في البعض الآخر.

مع الانخفاضات - فإن هناك مجموعة من الزيادات الجزئية في ارتفاع الموجات أو تلاشيها. فإذا شكلت أنت وعدد وافر من رفاقك صفاً من القوارب الصغيرة موازياً للحاجز، وسيعلن كل واحد منكم مدى الاضطراب الذي تسببت فيه موجات الماء عند مرورها، فإن النتيجة ستشبه كثيراً ما يبدو في أقصى يمين الشكل رقم (4-7). وستتحدد مواقع أكبر اضطراباً عندما تتطابق قمم (أو قيعان) الموجات النافذة من كل شق. أما المناطق التي يقل أو ينعدم فيها الاضطراب فهي تلك التي تنطبق فيها القمم النافذة من أحد الشقين مع القيعان النافذة من الشق الآخر مما يؤدي إلى تلاشي الموجتين.

وحيث أن اللوح الفوتوغرافي يسجل مدى "الاضطراب" الناتج من الضوء، فإن نفس المنطق الخاص بموجات الماء ينطبق على صورة موجات شعاع الضوء مما يؤدي إلى ظهور الصورة كما في الشكل رقم (4-8) عندما يكون الشقان مفتوحين. وتبين أكثر المناطق سطوعاً في الشكل رقم (4-8) تطابق قمم الموجات أو قيعانها من كل شق. بينما تبين المناطق الداكنة مواقع تطابق القمم من أحد الشقين مع القيعان من الشق الآخر مما يؤدي إلى تلاشيهما. ويعرف تتابع الحزم المضاءة والمظلمة باسم نسق التداخل. وتختلف هذه الصورة بشكل واضح عن تلك الموضحة في الشكل رقم (4-6). وهذه بالتالي تجربة قوية للتمييز بين طبيعة الضوء كجسيمات أو كموجات. وقد قام يونغ بإجراء تجربة من هذا النوع وجاءت نتائجها متطابقة مع الشكل رقم (4-8) مما يؤكد الطبيعة الموجية للضوء. انهزمت فكرة نيوتن عن طبيعة الضوء كجسيمات (على الرغم من أن ذلك استغرق وقتاً طويلاً قبل أن يقتنع الفيزيائيون به) وقد تبع ذلك أن وضع ماكسويل الأسس الرياضية القوية التي دعمت هذه الفكرة عن طبيعة الضوء كموجات.

الشكل رقم (4-8)



إذا كان الضوء موجة، وفُتح الشقان، فسيحدث تداخل بين أجزاء من الموجة النافذة من كل شق.

لكن آينشتاين، ذلك الرجل الذي قضى على نظرية الجاذبية الموقرة لنيوتن، يبدو أنه قد أحيا نموذج نيوتن عن طبيعة الضوء كجسيمات وذلك بإدخال الفوتونات. ومن الطبيعي أننا ما زلنا نواجه نفس السؤال: كيف يمكن أن تكون النظرة التي تعتبر الضوء جسيمات مسؤولة عن نسق التداخل في الشكل رقم (4-8) ولأول وهلة، قد تقترح الآتي. يتكون الماء من جزيئات H_2O - جسيمات الماء. ومع ذلك، عندما يتدفق الكثير من هذه الجزيئات بعضها مع البعض، فإنها تنتج موجات الماء بخواص التداخل المرافقة لهذه الموجات والتي تظهر في الشكل رقم (4-7). وهكذا، قد يبدو من المنطقي أن نتوقع أن خواص الموجات مثل أنساق التداخل يمكن أن تنتج من طبيعة الضوء كجسيمات في حالة وجود عدد هائل من الفوتونات، جسيمات الضوء.

وفي الواقع، فإن العالم الميكروسكوبي أكثر دقة بكثير. وحتى إذا خفضنا من شدة الضوء من مصدره في الشكل رقم (4-8) أكثر وأكثر إلى الدرجة التي عندها ستنطلق الفوتونات منفردة واحداً تلو الآخر تجاه الحاجز - وليكن المعدل مثلاً فوتوناً كل عشر ثوان - فإن اللوح الفوتوغرافي سيحتفظ بنفس شكله وسيظهر كما في الشكل رقم (4-8): وطالما انتظرنا فترة كافية من الزمن لمرور عدد هائل من هذه الحزم الضوئية المنفصلة من خلال الشقوق الطولية، ولتسجيل كل منها على شكل نقطة في المنطقة التي تصطدم فيها باللوح الفوتوغرافي، فإن هذه النقط ستتراكم لتكون صورة نسق التداخل، أي الصورة في الشكل رقم (4-8). وهذا أمر مذهل. كيف يمكن لجسيمات الفوتون المنفردة والتي تمر متعاقبة خلال الحاجز منفصلة لتصطدم باللوح الفوتوغرافي، كيف لها أن تتآمر لتنتج الحزم المضيئة والحزم المظلمة للموجات المتداخلة؟ ويدلنا المنطق التقليدي أن كل فوتون سيمر من أي من الشقين الأيمن أو الأيسر، ولذا فإنه من المتوقع أن نجد النسق المبين في الشكل رقم (4-6)، لكن ذلك لا يحدث.

وإذا لم تربكك هذه الحقيقة عن الطبيعة، فإن ذلك يعني أنك إما أن تكون قد رأيتها من قبل وأصبحت غير مكترث، أو أن عملية الشرح حتى الآن ليست واضحة بما فيه الكفاية. فإذا كان الأمر هو الحالة الأخيرة، إذن لنشرحها مرة أخرى بوسيلة مختلفة بعض الشيء. فإذا أغلقت الشق الأيسر وأطلقت الفوتونات واحداً تلو الآخر في اتجاه الحاجز، فإن بعضها سيمر والبعض الآخر لن يمر. وستكوِّن الفوتونات التي ستمر صورة على اللوح الفوتوغرافي نقطة بنقطة لتشبه الشكل رقم (4-4). ستجري التجربة مرة أخرى باستخدام لوح فوتوغرافي جديد، فاتحا هذه المرة الشقين معاً. ومن الطبيعي أنك ستعتقد أن ذلك سيعني فقط زيادة

عدد الفوتونات التي ستمر خلال الشقين في الحاجز، لتصطدم باللوح الفوتوغرافي، وبالتالي ستعرض اللوح لضوء كلي أكثر من المرة الأولى. لكنك عندما ستقوم باختبار الصورة الناتجة في ما بعد، فإنك لن تجد فقط أن المواقع التي كانت داكنة في التجربة الأولى قد أصبحت مضيئة الآن، ولكن عكس ما هو متوقع، ستكون هناك مواقع أخرى على اللوح الفوتوغرافي كانت مضيئة في التجربة الأولى أصبحت الآن مظلمة، كما في الشكل رقم (4-8). و"بزيادة" عدد الفوتونات المنفردة التي تصطدم باللوح الفوتوغرافي فإنك "ستقلل" من درجة سطوع بعض المناطق. وبطريقة ما فإن جسيمات الفوتون المفردة والمنفصلة مؤقتاً قادرة على أن تلاشي بعضها البعض. وتخيل هذا الأمر الغريب: بعض الفوتونات التي كان من الممكن أن تمر خلال الشق الأيمن لتصطدم باللوح في إحدى المناطق المظلمة في الشكل رقم (4-8)، لن تتمكن من فعل ذلك عندما يكون الشق الأيسر مفتوحاً (وهو سبب إظلام تلك المنطقة الآن). لكن كيف بالله أن حزمة رقيقة من الضوء تمر خلال أحد الشقوق تتأثر بحالة الشق الآخر مفتوحاً أم لا؟ وكما ذكر فينمان، إنه أمر غريب، وكأنك لو أطلقت بندقية آلية تجاه الحاجز وعندما يكون الشقان مفتوحين، فإن الطلقات المنفردة والمستقلة ستلاشي بعضها البعض، تاركة نسقاً من المواقع التي لم تتأثر على سطح الهدف - وهي المواقع التي ستصاب إذا كان هناك ثقب واحد فقط هو المفتوح.

وتبين مثل هذه التجارب أن جسيمات الضوء عند آينشتاين تختلف تماماً عن تلك التي قال بها نيوتن. وبشكل ما، فإن الفوتونات - ولو أنها جسيمات - تتضمن كذلك صفات شبيهة بموجات الضوء. وحقيقة أن طاقة هذه الجسيمات تتحدد بواسطة صفة من صفات الموجات - التردد - هي أول إشارة إلى وجود اتحاد غريب. لكن كل من الظاهرة الكهروضوئية وتجربة الشق المزدوج قد جعلت المشكلة أكثر وضوحاً. وتبين الظاهرة الكهروضوئية أن للضوء خواص الجسيمات. أما تجربة الشق المزدوج فقد أوضحت أن للضوء خواص تداخل الموجات. ويبيِّن الاثنان معاً أن للضوء خواص مثل كل من الموجات والجسيمات. ويتطلب العالم الميكروسكوبي أن نحشد حدسنا حول وجود شيء هو إما موجة أو جسيمة، أو احتمال وجود الشيئين معاً. وهنا ظهرت للوجود مقولة فينمان أن "لا أحد يفهم ميكانيكا الكم"، ويمكن أن ننطق بكلمات مثل "ثنائية جسيمة - موجة". ومن الممكن ترجمة هذه الكلمات إلى صيغة رياضية تصف تجارب العالم الحقيقي بدقة مذهلة. لكنه في غاية الصعوبة أن نفهم على مستوى حدسي عميق الصفات المبهرة للعالم المجهري.

سادساً: الجسيمات المادية هي الأخرى موجات

في العقود القليلة الأولى من القرن العشرين، تصارع العديد من كبار علماء الفيزياء النظرية بلا هوادة لتطوير مفهوم معقول فيزيائياً وصحيح رياضياً للصفات المجهرية الدفينة (حتى الآن). فمثلاً، حدث تقدم محسوس في تفسير خواص الضوء المنبعث من ذرات الهيدروجين المتوهجة حرارياً، بقيادة نيلز بوهر في كوبنهاغن. غير أن ذلك وأبحاثاً أخرى أجريت قبل منتصف العشرينيات من القرن العشرين كانت مجرد بديل مؤقت من تزاوج أفكار القرن التاسع عشر مع مفاهيم الكم المكتشفة حديثاً، أكثر منها أساساً متماسكاً لفهم العالم الفيزيائي. وعند مقارنة نظرية الكم المطورة جزئياً بالإطار المنطقي الواضح لقوانين نيوتن عن الحركة أو النظرية الكهرومغناطيسية لماكسويل، تبدو نظرية الكم في حالة مشوشة.

في سنة 1923 أضاف النبيل الفرنسي الشاب، الأمير لويس دي برويل، عنصراً جديداً في المعركة الدائرة حول الكم، وهو العنصر الذي كان مقدراً له أن يساعد في الوصول إلى إطار رياضي لميكانيكا الكم الحديثة التي أكسبته جائزة نوبل في الفيزياء سنة 1929. وقد تحمس دي برويل سلسلة المفاهيم المتأصلة في النسبية الخاصة لآينشتاين، فاقترح ثنائية الموجة - جسيمة وأنها لا تنطبق فقط على الضوء، بل على المادة بنفس الشكل. وقد فكر بالطريقة المبدئية الآتية: إذا كان آينشتاين قد ربط بين الكتلة والطاقة في معادلته ، وكان بلانك وآينشتاين قد ربطا بين الطاقة وتردد الموجات لذا فإنه عند جمع الاثنين معاً، فإن الكتلة لابد لها من تجسيد لشكل موجي أيضاً. وبعد إمعان الفكر في هذا الاتجاه، اقترح دي برويل أنه تماماً مثل كون الضوء خاصية موجية أظهرت لها نظرية الكم صفة الجسيمات، فإن الإلكترون - الذي عادة نفكر فيه كجسيمة - يمكن أن تكون له صفة بمدلول الموجات. أعجب آينشتاين فوراً بفكرة دي برويل، حيث أنها كانت التطور الطبيعي لمساهماته في النسبية والفوتونات. ومع ذلك فلا شيء يمكن أن يحل محل الإثبات التجريبي. وكان مقدراً لمثل هذا الإثبات أن يأتي عاجلاً في أبحاث كلينتون دافيدسون وليستر جيرمر.

في منتصف العشرينيات من القرن العشرين، كان كل من دافيدسون وجيرمر، من علماء الفيزياء التجريبيين، من شركة تليفونات بيل، قد درسا كيفية انعكاس شعاع من الإلكترونات من سطح كتلة من النيكل. وكل ما يهمنا في هذا الأمر أن بلورات النيكل في مثل هذه التجربة تقوم بعمل الشقين الطوليين في التجربة الموضحة في الأشكال - بالمقطع السابق. وفي الحقيقة، فإن من المقبول تماماً أن نفكر في هذه التجربة على أنها نفس التجربة المصورة في ذلك المقطع، غير أننا

استبدلنا شعاع الضوء بشعاع من الإلكترونات. وسنتبنى وجهة النظر هذه. فعندما اختبر دافيدسون وجيرمر الإلكترونات أثناء مرورها خلال الشقين الطوليين في الحاجز، بأن سمحا لها بأن تصطدم بشاشة فوسفورية لتسجل موقع الصدمة التي يحدثها الإلكترون كنقطة مضيئة - وهو في الواقع ما يحدث في جهاز التليفزيون - وجدا شيئاً مبهراً. فقد ظهر نسق شبيه بذلك الموجود في الشكل رقم (4-8). ولذا فقد أظهرت تجربتهما أن ظاهرة التداخل تحدث للإلكترونات، وهي الأثر الدال على "الموجات". وفي النقاط المظلمة على الشاشة الفوسفورية، كانت الإلكترونات تلاشي بعضها البعض بطريقة أو بأخرى، تماماً كما في حالة تداخل القمم والقيعان في موجات الماء. وحتى إذا خفضت شدة شعاع الإلكترونات إلى الدرجة التي سينبعث فيها إلكترون واحد مثلاً، كل عشر ثوان، فإن الإلكترونات المفردة ستظل تظهر حزماً من المواقع المضيئة والمظلمة - بقعة واحدة كل مرة. وبطريقة ما، وكما هو الحال مع الفوتونات، فإن الإلكترونات المنفردة "تتداخل" بعضها مع بعض، بمعنى أن الإلكترونات المنفردة، وبعد فترة من الزمن، ستعيد بناء نسق التداخل المرتبط بالموجات. ونحن مضطرون بشكل لا فكاك منه لأن نستنتج أن كل إلكترون يتضمن خاصية موجية مترافقة مع صورتها كجسيمات، التي هي أكثر ألفة لنا.

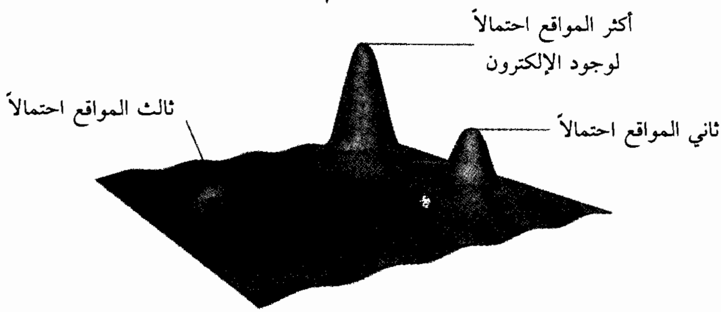
ومع أننا قد وصفنا هذا في حالة الإلكترونات، فإن التجارب المماثلة ستقودنا إلى استنتاج أن كل المادة لها خاصية موجية. لكن كيف ينسجم ذلك مع خبرتنا في عالمنا الحقيقي عن المادة كشيء جامد وثابت، ولا يمكن بأي حال أن يشبه الموجة؟ حسناً، وضع دي برويل صيغة لأطوال موجات المادة، وقد أظهرت أن طول الموجة يتناسب مع ثابت بلانك $\hbar$ (وبصورة أدق، فإن طول الموجة يساوي $\hbar$ مقسوماً على عزم الجسم المادي). وحيث إن $\hbar$ صغيرة جداً، فإن أطوال الموجات الناتجة ستكون بالمثل ضئيلة مقارنة بالمقاييس العادية. ولهذا السبب فإن الخاصية الموجية للمادة تصبح واضحة بشكل مباشر فقط في دراسة العالم المجهري. وتماماً كما في حالة القيمة الهائلة لسرعة الضوء C، والتي تحجب الكثير من طبيعة المكان والزمان الحقيقية، فإن ضآلة $\hbar$ تحجب السمات الموجية للمادة في حياتنا اليومية.

سابعاً: أية موجات؟

جعلت ظاهرة التداخل التي اكتشفها كل من دافيدسون وجيرمر الطبيعة الموجية للإلكترونات واضحة بشكل ملموس. لكن موجات ماذا؟ كان الفيزيائي النمساوي إروين شرودنغر قد اقترح مبكراً أن الموجات عبارة عن إلكترونات

"مكشوطة" ، وقد قرّب هذا التعبير "الإحساس" بالموجة الإلكترونية، لكنه كان تقريبياً جداً. وعندما تكشط شيئاً ما فإن جزءًا منه يتواجد هنا وجزءاً آخر يتواجد هناك. إلا أنه لا يمكن أن يتصادف وجود نصف أو ثلث إلكترون أو أي جزء آخر منه في هذه الحالة. وهذا يجعل من الصعب أن نتخيل حقيقة ما هو الإلكترون المكشوط. وكبديل لذلك، قام الفيزيائي الألماني ماكس بورن سنة 1926 بتنقيح لتفسيرات شرودنغر حول موجة الإلكترون. وما زالت تفسيرات ماكس بورن هي السائدة حتى الآن بعد إضافات بوهر ورفاقه إليها. كانت اقتراحات بوهر من أغرب سمات نظرية الكم، لكنها كانت مدعمة بكم هائل من البيانات التجريبية. أكد بوهر أن موجة الإلكترون لابد من تفسيرها بمفهوم "الاحتمالية". ففي الأماكن حيث يكون مقدار الموجة كبيراً (والأكثر دقة مربع المقدار) تكون أكثر المواقع احتمالاً لوجود الإلكترون. أما في الأماكن التي فيها مقدار الموجة صغير، فهي التي يكون احتمال وجود الإلكترون فيها أقل ما يمكن. ويصور الشكل رقم (4-9) مثالاً على ذلك.

الشكل رقم (4-9)



الموجة المصاحبة للإلكترون تكون أكبر حيثما احتمال وجود الإلكترون أكبر، وتكون أصغر كثيراً في أماكن الاحتمال الأقل لوجود الإلكترون.

وفي الحقيقة، هذه الفكرة غريبة. فما شأن الاحتمالية في صياغة الفيزياء الأساسية؟ فقد تعودنا على الاحتمالية في سباق الخيل، وفي المراهنة على وجه العملة عند إلقائها، وعلى موائد القمار، وهذا يعكس تماماً عدم معرفتنا التامة بالأمر. فإذا كنا نعرف "بدقة" سرعة عجلة الروليت ووزن وصلابة الكرة الصغيرة وموقع وسرعة تلك الكرة عند سقوطها على العجلة، والخواص الدقيقة للمادة المصنوعة منها التجويفات في هذه العجلة ... الخ، ثم استخدمنا حاسبات لها المقدرة الكافية على الحسابات الدقيقة، فإننا طبقاً للفيزياء الكلاسيكية يمكن أن

نتنبأ بتعيين أين ستستقر الكرة. وتعتمد نوادي القمار على عدم مقدرة الأشخاص على التحقق من كل هذه المعلومات أو على إجراء الحسابات الضرورية قبل المراهنة. ولكننا نرى أن الاحتمالية على مائدة الروليت لا تعكس أي شيء أساسي بالتحديد عن الكيفية التي يسير بها الكون. وعلى النقيض، فإن ميكانيكا الكم تدخل مفهوم الاحتمالية إلى أعمق المستويات في الكون. ووفقاً لبورن وللتجارب التي دامت أكثر من نصف قرن، فإن الطبيعة الموجية للمادة تعني أن المادة نفسها لابد من أن توصف في صورة احتمالية بشكل أساسي. ويبين دي بروبل أنه للأجسام الكبيرة مثل فنجان القهوة وعجلة الروليت تكون الخاصية الموجية حتمياً غير ملحوظة، ولمعظم الأمور العادية فإن احتمالية ميكانيكا الكم المصاحبة يمكن أن تهمل تماماً. لكن على المستويات المجهرية فإن أفضل ما يمكن أن يقال هو أن للإلكترون احتمالية محددة في أن توجد في أي موقع معين.

وللتفسير الاحتمالي الفضل في أن موجة الإلكترون لها نفس سلوك الموجات الأخرى - فهي مثلاً، تصطدم بعائق ما وتعطي كل أنواع الاهتزازات المحددة - ولا يعني ذلك أن الإلكترون نفسه قد انشطر إلى قطع منفصلة. وبالأحرى، فإن ذلك يعني أن هناك عدداً من المواقع يمكن للإلكترون أن يتواجد فيها بدرجة احتمال لا يمكن إهمالها. وعملياً، فإن ذلك يعني أنه لو تكررت تجربة معينة متضمنة إلكتروناً مرات ومرات بشكل متطابق تماماً، فإننا لن نحصل على نفس الإجابة طوال هذه المرات، أي تحديد موقع الإلكترون. وبالأحرى فإن التكرار المتتابع للتجربة سيؤدي إلى مجموعة من النتائج المختلفة لها خاصية أن عدد مرات تواجد الإلكترون في أحد المواقع محكوم بشكل الموجة الاحتمالية للإلكترون. فإذا كانت احتمالية الموجة (والأكثر دقة مربع احتمالية الموجة) مرتين أكبر في الموقع A مما في الموقع B، فإن النظرية تتنبأ بأن إجراء التجربة مرات متكررة ومتتابعة سيؤدي إلى اكتشاف وجود الإلكترون في الموقع A عدداً من المرات أكبر مرتين من وجوده في الموقع B. ولا يمكن توقع نتيجة التجربة، لكن الأفضل أن نتوقع احتمال حدوث أية نتيجة.

ومع ذلك، وطالما كنا قادرين على حساب الشكل الدقيق للموجات الاحتمالية، فإن احتمالية التنبؤات يمكن اختبارها بتكرار تجربة معينة عدة مرات، وبالتالي يمكن قياس احتمال الحصول على نتيجة معينة تجريبية. وبعد مرور بضعة أشهر على اقتراح دي برويل، اتخذ شرودنغر خطوات حاسمة في هذا الاتجاه بوضع معادلة تحكم شكل الموجات الاحتمالية وتطورها، أو كما عرفت بعد ذلك، الدوال الموجية. ولم يمض وقت طويل حتى أصبحت معادلة شرودنجر

والتفسيرات الاحتمالية تستخدم للحصول على تنبؤات دقيقة بشكل مذهل. وبحلول العام 1927، كانت الأمور الكلاسيكية قد فقدت براءتها. وقد ولى عصر كان العالم فيه يعمل كالساعة، حيث عناصر مكوناته قد دفعت إلى الحركة في لحظة ما من الماضي، وما زالت تؤدي دورها مستسلمة لقدرها المحتوم. ووفقاً لميكانيكا الكم، فإن الكون يتطور تبعاً لقواعد رياضية دقيقة وصارمة، غير أن هذا الإطار يحدد فقط احتمال حدوث أي شيء في المستقبل - وليس أي تغير في هذا المستقبل.

وجد الكثيرون أن هذه النتيجة مربكة، بل وحتى غير مقبولة. وكان آينشتاين أحد هؤلاء. وفي واحدة من أكثر المقولات شهرة في الفيزياء على مر الزمان، عتب آينشتاين على ميكانيكا الكم، قائلا: "إن الله لا يلعب النرد مع الكون". وقد شعر أن الاحتمالية قد ظهرت في الفيزياء الأساسية لأن الصورة الرقيقة لأسباب ظهورها في حالة عجلة الروليت: نقص أساسي في فهمنا. وفي نظر آينشتاين فإنه لا مكان في العالم لمستقبل يتضمن شكله أي عنصر من عناصر الصدفة. فيجب أن تتنبأ الفيزياء بالكيفية التي يتطور بها الكون، وليس مجرد احتمالات بأن يحدث أي تطور معين. لكن التجربة تلو الأخرى - وبعضها الأكثر إقناعا أجريت بعد وفاته - قد أثبتت أن آينشتاين كان على خطأ. وكما قال عالم الفيزياء النظرية البريطاني ستيفن هوكنغ في هذا الصدد: "لقد كان آينشتاين هو المشوش وليست نظرية الكم"[6].

وبالرغم من ذلك، فإن الجدل حول ما تعنيه ميكانيكا الكم ظل محتدماً. اتفق الجميع على كيفية استخدام معادلات نظرية الكم للتوصل إلى تنبؤات دقيقة. لكن لم يكن هناك إجماع حول ما يعنيه وجود موجات احتمالية أو الكيفية التي "تختار" بها الجسيمة أي مستقبل ممكن من بين العديد منها الذي تتبعه، أو حتى ما إذا كانت تختار بالفعل أو تنفصل بدلاً من ذلك كرافد لتعيش خارج كل احتمالات المستقبل في عوالم متوازية دائمة التمدد. وتستحق هذه الموضوعات التفسيرية أن يفسح لها كتاب بأكمله، وفي الحقيقة هناك العديد من الكتب الرائعة التي تمزج طريقة بأخرى من طرق التفكير في نظرية الكم. والأمر الذي يبدو مؤكداً أنه مهما اختلفت طرق تفسير ميكانيكا الكم، فإنها تظهر من دون أي لبس أن الكون قد تأسس على مبادئ عجيبة من وجهة نظر خبرتنا اليومية.

(6) ستيفن هوكنغ، محاضرة في ندوة أمستردام عن الجاذبية، والثقوب السوداء، ونظرية الأوتار، 21 حزيران/ يونيو 1997.

والدرس الذي يمكن استخلاصه من ميكانيكا الكم والنسبية أننا إذا اختبرنا بعمق الوظائف الأساسية للكون فإننا قد نتوصل إلى أشياء مختلفة تماماً عن توقعاتنا. وقد تتطلب الجرأة التي نطرح بها الأسئلة العميقة مرونة غير مسبوقة إذا كان علينا أن نتقبل الإجابات.

ثامناً: منظور فينمان

كان ريتشارد فينمان واحداً من أعظم علماء الفيزياء النظرية بعد آينشتاين. وقد تقبل تماماً اللب الاحتمالي لميكانيكا الكم، لكنه في السنوات التي تلت الحرب العالمية الثانية اقترح وسيلة قوية جديدة في ما يتعلق بالنظرية. ويتفق منظور فينمان تماماً مع كل ما سبق من منطلق التنبؤات العددية. لكن صياغته كانت مختلفة. ولنصف ذلك من منظور تجربة الإلكترون والشقين الطوليين.

والشيء المربك في الشكل رقم (4-8) هو أننا نتصور أن على كل إلكترون أن يمر خلال أحد الشقين الأيسر أو الأيمن، ولذا فإننا نتوقع اتحاد الشكلين رقمي (4-4) و(4-5) في الشكل رقم (4-6) ليمثل النتائج بدقة. ولا يعير الإلكترون الذي يمر من الشق الأيمن أي اهتمام لوجود شق أيسر، والعكس صحيح. لكن بطريقة ما، يحدث ذلك. ويتطلب النسق التداخلي الناتج أن يتداخل ويمتزج شيء ما ذو حساسية لكلا الشقين، حتى لو أطلقنا الإلكترونات واحداً تلو الآخر. ولقد فسر كل من شرودنغر، ودي برويل، وبورن هذه الظاهرة بأن نسبوا لكل إلكترون موجة احتمالية. ومثل موجات الماء في الشكل رقم (4-7)، فإن الموجة الاحتمالية للإلكترون "ترى" كلا الشقين ومعرضة لنفس نوع التداخل نتيجة التمازج. والأماكن التي تتعاظم فيها الموجات الاحتمالية بالتمازج تشبه الأماكن ذات الاضطراب المحسوس في الشكل رقم (4-7)، هي الأماكن التي يحتمل أن يتواجد فيها الإلكترون، بينما الأماكن التي تتناقص فيها الموجات الاحتمالية نتيجة التمازج تماثل الأماكن عديمة الاضطراب في الشكل رقم (4-7)، وهي المواقع التي لا يحتمل وجود الإلكترون فيها أبداً، أو حيث احتمال وجوده ضعيف جداً. تصطدم الإلكترونات واحداً فواحداً بالشاشة الفوسفورية، وتتوزع طبقا لهذا النمط الاحتمالي، الأمر الذي ينتج منه نسق تداخلي مثل الموجود بالشكل رقم (4-8).

اتخذ فينمان وجهة مختلفة. فقد تحدى الفرضيات الكلاسيكية الأساسية التي تعني أن على الإلكترون أن يعبر من الشق الأيسر أو الأيمن. وقد تعتقد أن هذا الأمر خاصية أساسية في كيفية سير الأشياء، وأن تحديه أمر أحمق. وفي النهاية،

ألا تستطيع أن "تنظر" إلى المنطقة الموجودة بين الشقين والشاشة الفوسفورية لتحدد من خلال أي شق سيعبر الإلكترون؟ أجل يمكنك ذلك. لكنك قد غيرت من التجربة الآن. ولكي "ترى" الإلكترون، لابد أن تفعل شيئاً ما - على سبيل المثال يمكن أن تسلط عليه الضوء، يعني أن ترتد الفوتونات من سطحه. لكن الآن، وبالمقاييس العادية، فإن الفوتونات عبارة عن مجسات صغيرة يمكن إهمالها، تنعكس من سطح الأشجار واللوحات الفنية والناس من دون أن تؤثر بشكل أساسي في حركة هذه الأشياء الكبيرة جداً نسبياً. غير أن الإلكترونات كتل صغيرة من المادة. وبصرف النظر عن الكيفية الدقيقة التي يجري بها تحديد الشق الذي سيعبر فيه الإلكترون، فإن الفوتون الذي سيرتد من الإلكترون سيؤثر بالضرورة في حركته التالية. وسيؤثر هذا التغير في الحركة في نتائج تجربتنا. فإذا أثرت في التجربة بالقدر الكافي فقط لتحديد الشق الذي سيعبر منه كل إلكترون، فإن التجارب تظهر أن النتائج ستختلف عن تلك الموجودة في الشكل رقم (4-8) لتصبح مثل تلك الموجودة في الشكل رقم (4-6)! ويؤكد عالم الكم أنه بمجرد تحديد الشق الذي سيذهب إليه الإلكترون، سواء كان الأيسر أو الأيمن، فإن التداخل بين الشقين سيتلاشى.

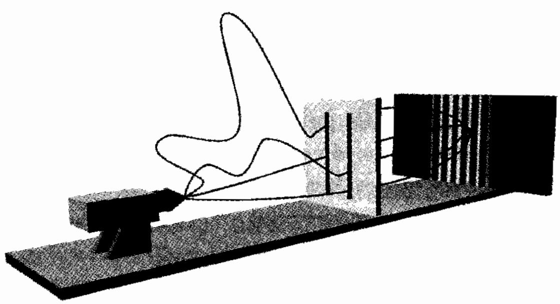
وهكذا، فإن فينمان كان على حق في إثارة هذا التحدي - على الرغم من أن خبرتنا في هذا العالم تتطلب في ما يبدو أن يعبر كل إلكترون من خلال أحد الشقين - حيث أيقن علماء الفيزياء في أواخر العشرينيات من القرن العشرين أن أية محاولة للتحقق من هذه الخاصية الأساسية الظاهرية للواقع تفسد التجربة.

زعم فينمان أن كل إلكترون ينفذ إلى الشاشة الفوسفورية فإنه في الواقع يعبر من خلال الشقين "معاً". ويبدو ذلك جنوناً، لكن انتظر: فإن الأمور ستصبح أكثر غرابة. كان فينمان يدفع بأن كل إلكترون منفرد أثناء انتقاله من المصدر إلى نقطة معينة على الشاشة الفوسفورية يتبع كل مسار محتمل في نفس الوقت. ويوضح الشكل رقم (4-10) القليل من هذه المسارات. يتجه الإلكترون بطريقة منظمة رائعة إلى العبور من الشق الأيسر. وفي نفس الوقت يتجه بطريقة منظمة رائعة إلى العبور من الشق الأيمن. يتجه الإلكترون ناحية الشق الأيسر ولكنه فجأة يغير من مساره ليتجه إلى الشق الأيمن. يتسكع الإلكترون جيئةً وذهاباً ليعبر في النهاية من الشق الأيسر. يذهب الإلكترون في رحلة طويلة إلى مجرة أندروميدا قبل أن يعود مرة أخرى ويمر من خلال الشق الأيسر في طريقه إلى الشاشة. ويظل الإلكترون سائراً - وتبعا لفينمان، فإنه يتنسم في نفس الوقت كل طريق ممكنة تربط بين نقطة انطلاقه ومحطته النهائية.

بيَّن فينمان أنه يمكن أن يحدد عدداً من هذه المسارات بطريقة تجعل متوسط خلطها يعطي نفس النتائج تماماً للاحتمالية المحسوبة باستخدام منطلق دالة الموجة. وهكذا فإنه من منظور فينمان، لا توجد حاجة إلى موجات احتمالية لتصاحب الإلكترونات. وبدلاً من ذلك، علينا أن نتخيل شيئاً مماثلاً إن لم يكن أكثر غرابة. فاحتمال أن يصل الإلكترون إلى نقطة مختارة على الشاشة مبني على التأثير المختلط لكل مسار ممكن للوصول إلى هناك - مع أننا دائماً ننظر للإلكترون على أنه جسيمة. وتعرف هذه الطريقة باسم منطلق "مجموع مسارات" فينمان في ميكانيكا الكم[7].

وعند هذه النقطة توقف فهمك لتطور الفيزياء الكلاسيكية فجأة: فكيف يمكن لإلكترون وحيد أن يتخذ مسارات مختلفة في نفس الوقت - بل عدداً لا نهائياً من تلك المسارات؟ يبدو ذلك الاعتراض وجيهاً، غير أن ميكانيكا الكم - وهي فيزياء عالمنا - تتطلب أن نؤجل هذا الاعتراض مؤقتاً. وتتفق نتائج الحسابات التي استخدمت فيها طريقة فينمان مع طريقة الدالة الموجية التي تتفق بدورها مع التجارب. ويجب أن نترك الطبيعة لتملي ما هو المعقول وما هو غير المعقول. وقد

الشكل رقم (4-10)



تبعاً لصياغة فينمان لميكانيكا الكم، فإننا لابد أن ننظر إلى الجسيمات على أنها تنتقل من موقع إلى آخر عن طريق كل مسار ممكن. وهنا قليل من المسارات اللانهائية لإلكترون منفرد ينتقل من المصدر إلى الشاشة الفوسفورية. لاحظ أن هذا الإلكترون المنفرد يمر فعلياً من خلال الشقين معاً.

(7) من المفيد أن نذكر أن منطلق فينمان في ميكانيكا الكم يمكن استخدامه لاستنتاج المنطلق المعتمد على دالة الموجة والعكس صحيح، ولذا فإن كلا المنطلقين متكافئان تماماً. وعلى الرغم من أن المفاهيم واللغة والتفسير الذي يتضمنه كل منطلق مختلفة، إلا أن الإجابات التي يتوصل إليها كل منهما متطابقة تماماً.

كتب فينمان مرة يقول "تصف [ميكانيكا الكم] الطبيعة بأنها منافية للعقل من وجهة النظر العامة. وهي تتفق تماماً مع التجارب. ولذا فإنني آمل أن نتقبل الطبيعة على أنها هي المنافية للعقل"(8).

لكن من دون النظر لكون الطبيعة منافية للعقل عندما نختبرها على المستوى المجهري، فإن الأمور يجب أن تكون متفقة في الخفاء حتى يمكن أن نستعيد الأحداث الواقعية المألوفة للعالم الذي نعيشه كل يوم. ومن هذه النتائج، أوضح فينمان أنك إذا اختبرت حركة الأجسام الكبيرة مثل كرة البيسبول أو الطائرات أو الكواكب، وهي كبيرة مقارنة بالجسيمات تحت الذرية - فإن قاعدة فينمان، التي تمنح أعداداً لكل مسار، تؤكد أن كل المسارات تلغي بعضها البعض تاركة مساراً واحداً فقط إذا أخذنا في الاعتبار اتحادها بعضها مع بعض. وفي الواقع فإن مساراً واحدا فقط من بين العدد اللانهائي من المسارات هو الذي يعنينا عند النظر في حركة الجسم. وهذا المسار على وجه الدقة هو الذي ظهر من قوانين نيوتن للحركة. وهذا هو السبب في أن الأشياء تبدو في حياتنا العادية - مثل الكرة عند قذفها في الهواء - وكأنها تتبع مساراً واحداً متفرداً يمكن التنبؤ به من نقطة الانطلاق إلى نهاية المسار. أما في حالة الأجسام المجهرية، فإن قاعدة فينمان التي تمنح أعدادا للمسارات تبين أن الكثير من المسارات المختلفة يمكن أن تساهم وتساهم بالفعل في حركة الجسم. فمثلاً، في تجربة الشق الطولي المزدوج، تمر بعض هذه المسارات عبر الشقوق المختلفة، لتعطي نسق التداخل الذي نلاحظه. ولذلك ففي العالم المجهري لا يمكن أن نجزم بأن الإلكترون يمر عبر شق معين من دون الآخر. ويشهد كل من نسق التداخل وصياغة فينمان البديلة لميكانيكا الكم بما لا يدع مجالاً للشك على عكس ذلك.

وكما نجد في التفسيرات المختلفة لكتاب ما أو شريط سينمائي عاملاً مساعداً بشكل أو بآخر لإدراك المفاهيم المختلفة للعمل (الكتاب أو الشريط السينمائي)، فإن نفس الشيء ينطبق على المنطلقات المختلفة لميكانيكا الكم. ومع أن منطلق الدالة الموجية و"مجموع مسارات" فينمان دائماً ما تتفق تماماً مع بعضها في التنبؤات، إلا أنها تعطينا طرقاً مختلفة للتفكير في ما يحدث. وكما سنرى في ما بعد، فإن أحد هذه المنطلقات يقدم إطاراً توضيحياً رفيع المستوى في بعض الاستخدامات.

---

(8) Richard Feynman, *QED: The Strange Theory of Light and Matter* (Princeton, NJ: Princeton University Press, 1988).

تاسعاً: غرابة الكم

وهنا لابد أن تكون قد استوعبت بعض الشيء من الطريقة الدرامية الجديدة التي يعمل بها الكون تبعاً لميكانيكا الكم. وإذا كنت لم تصبح بعد ضحية للأقوال المحيرة لبوهر، فإن غرابة الكم التي سنناقشها لابد أن تصيبك على الأقل بشيء من الدوار.

إن استيعابك ميكانيكا الكم بعمق أصعب من استيعابك لنظريتي النسبية - (مثلما يصعب) التفكير على غرار شخص صغير جداً قد ولد ونشأ في عالم مجهري. ومع ذلك فإن هناك سمة واحدة من سمات النظرية يمكن أن تعمل كنقطة مرجعية لحدسك، حيث إنها الصفة الرسمية التي تميز في الأساس بين الكم والمنطق الكلاسيكي. إنه مبدأ عدم التيقن الذي اكتشفه عالم الفيزياء الألماني ويرنر هيزنبرغ سنة 1927.

نبع هذا المبدأ من الاعتراض الذي يمكن أن تكون قد صادفته من قبل. فقد لاحظنا أن عملية تحديد الشق الطولي الذي يمر فيه الإلكترون (مكانه) سيؤثر بالضرورة في حركته التالية (سرعته). وكما يمكن أن نتأكد من وجود شخص ما بمجرد لمسه برفق أو بضربه على ظهره بشدة، فلماذا لا نستطيع أن نحدد مكان الإلكترون بواسطة مصدر ضوئي "أكثر رقة" للحصول على أضعف ما يمكن من التأثير في حركته؟ ومن وجهة نظر فيزياء القرن التاسع عشر، فإننا نستطيع ذلك. وباستخدام مصباح خافت جداً (وجهاز حساس جداً لقياس الضوء) فإننا يمكن أن نحصل على صدمة متناهية الضآلة في تأثيرها في حركة الإلكترون. لكن ميكانيكا الكم تلقي الضوء على عيوب هذا المنطق. فعندما نخفض من شدة مصدر الضوء، فإننا نعلم الآن أننا بذلك نقلل من عدد الفوتونات التي تنبعث منه. فإذا وصلنا إلى الحد الذي تنطلق فيه الفوتونات منفردة فإننا لن نستطيع تخفيض الضوء أكثر من ذلك من دون أن نطفئه بالفعل. وتضع ميكانيكا الكم حدًّا أساسياً "لدرجة الرقة" التي عليها المجس المستخدم. وبذلك فإن هناك دائماً درجة دنيا من الاضطراب الذي نسببه لسرعة الإلكترون أثناء تحديدنا لموقعه.

وهذا صحيح على الأغلب. ويدلنا قانون بلانك على أن طاقة الفوتون تتناسب طردياً مع تردده (تتناسب عكسياً مع طول الموجة). وباستخدام ضوء أقل فأقل تردداً (أكبر فأكبر في طول الموجة) فإننا بذلك يمكن أن نحصل على فوتونات منفردة أكثر فأكثر رقة. وهنا مربط الفرس. فعندما تنعكس موجة من سطح جسم ما فإن المعلومات التي نتلقاها منها تكفي بالكاد لتحديد موقع الجسم في

حدود هامش من الخطأ مساوٍ لطول الموجة. وللإحساس الحدسي بهذه الحقيقة الهامة، فلنتخيل أنك تحاول أن تحدد بالضبط موقع صخرة كبيرة مغمورة جزئياً عن طريق تأثيرها في موجات المحيط التي تمر بها. وعند اقتراب الموجات من الصخرة فإنها تشكل سلسلة من الحلقات على شكل موجات تعلو وتهبط في تتابع ونظام جيد. وبعد أن تمر هذه الحلقات من الموجات بالصخرة فإنها تضطرب، وهو ما يدل على وجود الصخرة المغمورة. ومثل العلامات المحفورة على المسطرة والتي تحدد الأطوال، فإن حلقات الموجات في صعودها وهبوطها هي أصغر الوحدات التي تشكل سلسلة الموجات، ولذلك فإنه باختبار مدى الاضطراب الذي تحدثه الصخرة فقط، يمكننا تحديد موقع الصخرة في حدود هامش من الخطأ مساوٍ لطول حلقة من الموجات، أي طول الموجة. وفي حالة الضوء، فإن الفوتونات عموماً هي حلقات الموجات المنفردة (حيث يتحدد ارتفاع حلقة الموجات بعدد الفوتونات)؛ وعليه فإن الفوتون يمكن أن يستخدم لتحديد موقع جسم بالضبط في حدود دقة مساوية لطول موجته.

وهكذا فإننا نواجه فعل التوازن الناتج من ميكانيكا الكم. فإذا استخدمنا تردداً عالياً (أطوال موجات قصيرة) للضوء فإننا نستطيع تحديد موقع الإلكترون بدقة أكثر. غير أن الفوتونات عالية التردد لها طاقة كبيرة، ولذلك فإنها تحدث اضطراباً في سرعة الإلكترون. أما إذا استخدمنا ضوءًا منخفض التردد (أطوال موجات كبيرة) فإننا نقلل من التأثير في حركة الإلكترون، حيث أن الفوتونات هنا لها طاقة صغيرة نسبياً، لكننا في هذه الحالة سنضحي بدقة تحديد موقع الإلكترون. وقد قام هيزنبرغ بإخضاع هذا التنافس لمفهوم الكم واكتشف علاقة رياضية تربط بين دقة تحديد موقع الإلكترون ودقة تعيين سرعته. فقد وجد - متمشياً مع نقاشنا - أن كلا منهما يتناسب عكسياً مع الآخر: فالدقة الأعلى في تحديد الموقع تعني بالضرورة دقة أقل في قياس السرعة، والعكس صحيح. وما هو في غاية الأهمية، وبالرغم من تركيزنا في نقاشنا على طريقة معينة لتحديد ما يتعلق بالإلكترون، فإن هيزنبرغ قد بين أن دقة تحديد الموقع تأتي على حساب دقة تعيين السرعة والعكس صحيح، وأن هذه الحقيقة من الأساسيات الصحيحة بصرف النظر عن الأجهزة المستخدمة أو الطريقة المتبعة. وعلى عكس إطار نيوتن أو حتى إطار آينشتاين اللذين توصف فيهما حركة الجسم بتحديد مكانها وسرعتها، فإن ميكانيكا الكم تبين أنه على المستوى المجهري لن نستطيع تحديد كليهما بدقة تامة. والأكثر من ذلك، إذا عرفت أحدهما بدقة أكثر فإن الآخر سيصبح معروفاً بدقة أقل. ومع أننا قد شرحنا هذا الأمر بالنسبة للإلكترونات، إلا أن هذه الأفكار تنطبق تماماً على

كل مكونات الطبيعة.

حاول آينشتاين أن يقلل من هذا الابتعاد عن الفيزياء الكلاسيكية، بأن يزعم بأنه على الرغم من أن منطق الكم يبدو بجلاء أنه يحدد معرفة الإنسان بموقع وسرعة الإلكترون، إلا أن الإلكترون ما زال يملك موقعاً وسرعة محددين كما تعلمنا دائماً. لكن خلال العقدين الأخيرين أوضح التقدم النظري الذي أحرز بقيادة عالم الفيزياء الأيرلندي المتوفى جون بل، وبالنتائج التجريبية لآلان أسبكت ومعاونيه، بما لا يدع مجالاً للشك، خطأ آينشتاين. فلا يمكن أن نحدد موقع الإلكترون وفي نفس الوقت نحدد سرعته، ولا يخص هذا الأمر الإلكترونات فقط، بل كل شيء. وتبين ميكانيكا الكم أنه لا يمكن التحقق تجريبياً من هذه المقولة فقط - كما هو مشروح أعلاه - ، بل إنها تتناقض بشكل مباشر مع النتائج التجريبية التي توصلنا إليها حديثاً.

وفي الواقع إذا أمسكت إلكتروناً ووضعته في صندوق كبير ثم بدأت في الضغط على جدران الصندوق لتحديد موقع الإلكترون بدقة أكثر فإنك ستجد أن الإلكترون سيصبح أكثر فأكثر هيجاناً. كما لو كان قد أصيب بعقدة الخوف من الأماكن المغلقة، وسيصبح كالمجنون - مصطدماً بجدران الصندوق بسرعة متزايدة شديدة الهياج غير متوقعة. فالطبيعة لا تسمح لمكوناتها بأن تحاصر. وفي الحالة المذكورة من قبل، وإذا تصورنا أن $\hbar$ أكبر كثيراً من قيمتها في العالم الحقيقي، مؤدية إلى أن تخضع الأشياء العادية في حياتنا اليومية لتأثيرات الكم، فإن مكعبات الثلج في مشروبات جورج وغريس ستتحرك بجنون لأنها ستعاني من الخوف من الأماكن المغلقة بالمفهوم الكمي. ومع أن الحانة المذكورة مكان خيالي - فقيمة $\hbar$ في الواقع في غاية الضآلة، فإن هذا النوع من الخوف من الأماكن المغلقة هو صفة عامة للعالم المجهري. وتصبح حركة الجسيمات المجهرية أكثر عنفاً عند اختبارها وحصرها في أماكن محدودة من الفراغ.

ويؤدي مبدأ عدم التيقن كذلك إلى نشوء ظاهرة مدهشة تعرف باسم ظاهرة "المرور فى نفق الكم". فإذا أطلقت رصاصة من البلاستيك صوب حائط أسمنتي سمكه عشرة أقدام، فإن الفيزياء الكلاسيكية تؤكد ما تنبئك به غريزتك: سترتد الرصاصة إليك. والسبب في ذلك ببساطة أن الطلقة لا تملك الطاقة الكافية لتنفذ من خلال هذا العائق الهائل. غير أنه على مستوى الجسيمات الأساسية فإن ميكانيكا الكم تبين بما لا يدع مجالاً للشك أن دوال الموجة - أي الموجات الاحتمالية - للجسيمات المكونة للرصاصة تملك قطعاً صغيرة جداً ستخترق هذا الحائط. ويعني ذلك أن هناك فرصة ضئيلة - لكنها ليست صفراً - أن تخترق

الرصاصة بالفعل الحائط لتندفع من الجانب الآخر. كيف يحدث ذلك؟ يرجع السبب، مرة أخرى، إلى مبدأ عدم التيقن لهيزنبرغ.

ولإدراك ذلك، تخيل أنك عاطل تماماً ثم فجأة علمت أن لك قريباً من بعيد قد توفي تاركاً لك ثروة هائلة لترثها. والمشكلة الوحيدة أنك لا تملك ثمن تذكرة الطائرة للوصول إلى هناك. ستشرح الأمر لأصدقائك: فإذا سمحوا لك بالتغلب على الحاجز الذي يفصل بينك وبين ثروتك الجديدة بأن يقرضوك لفترة قصيرة المال لشراء التذكرة، فإنك ستجازيهم بسخاء بعد عودتك. لكن لا يملك أحد منهم المال ليقرضك. غير أنك تتذكر أن لك صديقاً قديماً يعمل بشركة طيران، وستتوسل إليه بنفس الطلب. ومرة أخرى لا يستطيع أن يقرضك المال لكنه يقدم لك حلاً. فنظام المحاسبة في شركات الطيران يعمل بطريقة معينة تفيد أنه إذا أبرقت ثمن التذكرة خلال 24 ساعة من وصولك إلى نهاية الرحلة، فلن يعرف أحد أنك لم تدفع ثمن التذكرة قبل السفر، وبهذه الطريقة ستحصل على ميراثك.

وطرق المحاسبة في ميكانيكا الكم تشابه ذلك تماماً. وكما بين هيزنبرغ أن هناك تبادلاً بين دقة تحديد الموقع والسرعة، فقد بين كذلك أن هناك تبادلاً مشابها في دقة قياس الطاقة والوقت الذي تستغرقه عملية القياس. وتؤكد ميكانيكا الكم أنك لا تستطيع تحديد طاقة جسيمة ما بالضبط في لحظة معينة من الزمن. فالدقة المتزايدة لقياس الطاقة تتطلب فترة زمنية أطول لإجراء القياس. وعموماً فإن ذلك يعني أن طاقة الجسيمة يمكن أن تتأرجح كثيراً طالما أن هذا التأرجح يحدث في فترة قصيرة بما فيه الكفاية. تماماً مثل نظام المحاسبة في شركة الطيران الذي "يسمح لك" بأن "تقترض" ثمن تذكرة الطيران بشرط أن ترده بسرعة كافية، فإن ميكانيكا الكم تسمح للجسيمة أن "تقترض" طاقة طالما أنها ستردها خلال إطار زمني يحدده مبدأ عدم التأكد لهيزنبرغ.

وتبين رياضيات ميكانيكا الكم أنه كلما كبر حاجز الطاقة كلما قل احتمال حدوث هذا النظام المحاسبي المجهري البديع. غير أنه بالنسبة للجسيمات المجهرية التي تواجه الارتطام بالحائط الأسمنتي فإنها تستطيع في بعض الأحيان أن تقترض ما يكفي من الطاقة لتصنع المستحيل من وجهة نظر الفيزياء الكلاسيكية - أي تنفذ لحظياً عن طريق نفق من خلال منطقة لم يكن لهذه الجسيمات في البداية طاقة كافية لعبورها. وكلما ازداد تعقيد الأجسام التي ندرسها - تتكون من أعداد متزايدة من الجسيمات - فإن مثل هذا النفق الكمي يمكن أن يحدث ولكنه يصبح أقل احتمالاً، حيث لابد أن تكون كل الجسيمات موفقة للدرجة التي يمكنها أن تعبر من النفق الكمي معاً. وإلاّ كان من الممكن أن

تحدث كل الأمور الغريبة مثل اختفاء سيجار جورج وعبور قطعة الثلج من جدار الكأس واختراق جورج وغريس لجدار الحانة. وفي العالم الخيالي مثل الحانة المذكورة التي تخيلنا أن قيمة ħ فيها كبيرة، فإن مثل هذا النفق الكمي يصبح شيئاً عادياً. غير أن قواعد احتمالية ميكانيكا الكم - وبصفة خاصة القيمة الفعلية الضئيلة لـ ħ في العالم الواقعي - تبين أنك لو حاولت عبور الحائط مرة كل ثانية فإن عليك أن تستمر في هذه المحاولات زمناً أطول من عمر الكون لتصيب فرصة عبور الجدار أثناء إحدى المرات. وبمثل هذا الدأب الأبدي (والعمر الطويل)، فإنك قد تتمكن - آجلاً أم عاجلاً - من الخروج من الناحية الأخرى من الجدار.

ويصيب مبدأ عدم التيقن القلب من ميكانيكا الكم. وسمات الأجسام في أن لها مواقع وسرعات محددة، وأن لها طاقة محددة في لحظات معينة، والتي عادة ما نتصور أنها أمور أساسية ليست محل تساؤل، ننظر إليها الآن على أنها مجرد نتاج لضآلة ثابت بلانك بمقياس حياتنا اليومية. ومن أولى الأهميات أنه عند تطبيق الحقائق الكمية على نسيج الزمان فإنه يكشف عيباً مميتاً في "خيوط الجاذبية" ويؤدي إلى التناقض الثالث الأولي الذي واجهته الفيزياء خلال القرن الماضي.

الفصل الخامس

الحاجة إلى نظرية جديدة:
النسبية العامة في مواجهة ميكانيكا الكم

لقد تعمق فهمنا بشدة للعالم الفيزيائي خلال القرن الماضي. وقد مكنتنا الأدوات النظرية لميكانيكا الكم والنسبية العامة من فهم ووضع تنبؤات قابلة للاختبار تتعلق بالأمور الفيزيائية بدءًا من العالم الذري وتحت الذري إلى الظواهر التي تحدث على مستوى المجرات وتجمعات المجرات وفي ما وراء بنية الكون ذاته. وهو إنجاز بارز. ومن الملهم حقيقة أن المخلوقات الموجودة في أحد الكواكب التي تدور حول نجم عادي يقع في الطرف البعيد لمجرة عادية نسبياً قد تمكنت، من خلال التفكير والتجريب، من تأكيد واستيعاب بعض أعظم الخواص غموضاً فى العالم الفيزيائي. وعلى كل، فإن الفيزيائيين كعادتهم لن يهدأ لهم بال حتى يشعروا بإزاحة الغموض عن أعمق الأشياء وأكثرها أساسية في الكون. وهذا ما كان قد ألمح ستيفن هوكنغ إليه كخطوة أولى نحو إدراك "عقل الرب"[1].

وهناك أدلة وفيرة على أن كلا من ميكانيكا الكم والنسبية العامة لا تقدم هذا المستوى العميق لفهم الأمور. ولأن نطاق عمل كل منهما يختلف عن الآخر بشكل كبير فإن معظم المواقف تحتاج إلى استخدام إما ميكانيكا الكم أو النسبية العامة وليس الاثنين معاً. ومع ذلك، وفي ظروف خاصة جداً، عندما تكون الأشياء ذات كتلة هائلة وحجم صغير جداً - بالقرب من النقطة المركزية للثقوب السوداء أو كل الكون عند لحظة الانفجار الهائل، وهما مثالان فقط - يتطلب الأمر استخدام النسبية العامة وميكانيكا الكم من أجل فهم أفضل. وعندما نحاول جمع ميكانيكا الكم مع النسبية العامة فإن الوضع يشبه وضع اللهب بجوار البارود، وسيؤدي اتحادهما إلى كارثة مدوية. وتظهر الصياغة الجيدة للمسائل الفيزيائية

(1) Stephen Hawking, *A Brief History of Time: From The Big Bang To Black Holes,* Introduction by Carl Sagan, Illustration by Ron Miller (Toronto; New York: Bantam Books, 1988), p. 175.

إجابات غير منطقية عند مزج معادلات النظريتين معاً. وتتخذ الإجابات غير المنطقية شكل تنبؤات حول احتمال حدوث بعض العمليات في ميكانيكا الكم، فهي لا تجيء كنسبة 20٪ أو 73٪ أو 91٪، بل ما لا نهاية له. لكن بحق السماء ما الذي يعنيه احتمال أكثر من الواحد، ولا نقول ما لا نهاية؟ ونحن مدفوعون للقول بأن هناك خطأً جسيماً. وبالفحص الدقيق للخواص الأساسية للنسبية العامة وميكانيكا الكم فإننا يمكن أن نحدد هذا الخطأ.

أولاً: لب ميكانيكا الكم

عندما اكتشف هيزنبرغ مبدأ عدم التيقن، استدارت الفيزياء بحدة في اتجاه لم ترجع منه أبداً. فالاحتمالات ووظائف الموجة والتداخل والكَمّات تتضمن وسائل راديكالية جديدة لإدراك الواقع. ومع ذلك، فإن الفيزيائي "الكلاسيكي" العنيد قد يظل عالقاً ببصيص من الأمل في أن تتجمع كل هذه المفاهيم الحديثة في إطار واحد لن يبعد كثيراً عن الطريقة القديمة في التفكير. غير أن مبدأ عدم اليقين يقطع كل محاولة للتمسك بالماضي بشكل حازم.

وينبئنا مبدأ عدم التيقن بأن الكون عبارة عن مكان مضطرب عندما نختبره على مسافات أصغر وأصغر وفي أزمنة أقصر وأقصر. وقد رأينا بعض الأدلة على ذلك أثناء محاولاتنا - التي شرحناها في الفصل السابق - لتحديد موقع الجسيمات الأولية مثل الإلكترون بدقة: وذلك بتسليط ضوء ساطع ذي تردد متزايد على هذه الإلكترونات، لقياس موقعها بدقة متزايدة. لكن ذلك لن يمر من دون مقابل، حيث أن ملاحظاتنا ستصبح أكثر وأكثر اضطراباً. فطاقة الفوتونات عالية التردد تكون عالية، وبالتالي فإنها "تركل" الإلكترونات بشدة ما يغير من سرعتها بشكل ملحوظ. مثل الهياج الذي يحدث في حجرة مملوءة بالأطفال الذين تعرف مكانهم اللحظي بدقة عالية، لكن لا تملك أن تعرف سرعتهم واتجاههم أثناء حركتهم. وتعني عدم المقدرة على تحديد موقع وسرعة واتجاه الجسيمات الأولية أن العالم المجهري هو عالم مضطرب ذاتياً.

وعلى الرغم من أن هذا المثال يبين الارتباط الأساسي بين عدم التيقن والاضطراب، إلا أنه يكشف في الواقع فقط جزء من الرواية. وقد يقودك ذلك مثلا إلى التفكير في أن عدم التيقن ينتج فقط عندما نتعثر نحن الراصدين الخرقاء للطبيعة على مسرح الأحداث. لكن ذلك غير صحيح. ومثال الإلكترون المحبوس داخل صندوق صغير عندما ينفعل بعنف متحركاً في جميع الاتجاهات بسرعة كبيرة

يقربنا بعض الشيء من الحقيقة. فحتى بدون "ضربات مباشرة" من فوتونات التجربة المسببة للاضطراب، فإن سرعة واتجاه الإلكترون يتغيران بشدة وبشكل غير متوقع بين لحظة وأخرى. ولكن حتى هذا المثال لا يكشف كلية عن السمات المجهرية الخارقة للطبيعة التي ضمنها هيزنبرغ في اكتشافه. وحتى في أكثر المواقع هدوءًا، مثل جزء خالٍ من الفضاء المكان، فإن مبدأ عدم التيقن ينبئنا بأنه من منطلق التفضيل المجهري فإن هناك كماً هائلاً من الأحداث. وتزداد هذه الأحداث اضطرابا كلما صغرت مقاييس المسافة والزمن.

ويعتبر نظام المحاسبة الكمي أساسياً لفهم ذلك. فنحن نرى من الفصل السابق أنه تماماً مثل احتمال أن تقترض مؤقتاً النقود للتغلب على عقبة مالية هامة، فإن جسيمة مثل الإلكترون يمكن أن تقترض مؤقتاً طاقة للتغلب على حاجز فيزيائي حقيقي، وهذا صحيح. وتدفعنا ميكانيكا الكم خطوة هامة أبعد في تناولنا لهذا التشابه. تخيل شخصاً مدمناً للاقتراض، فهو يتنقل من صديق لآخر طالباً المال. فكلما قصرت الفترة الزمنية لحصوله على المال كلما طالب بقرض أكبر. فهو يقترض ويرد ثم يقترض ويرد مرات ومرات بلا هوادة، أي أنه يأخذ النقود ليعيدها في زمن قصير. ومثل أسعار الأسهم في البورصة في يوم مضطرب في شارع وول ستريت (شارع المال) فإن كمية النقود التي يمتلكها مدمن الاقتراض في أي لحظة تتفاوت بشدة قصوى، لكن في نهاية المطاف عندما تهدأ الأمور وبحساب مالياته يتضح أنه في موقف ليس أفضل من لحظة البداية.

ويؤكد مبدأ عدم التيقن لهيزنبرغ أن هناك إزاحة مضطربة مشابهة جيئةً وذهاباً للطاقة والعزم تحدث بصورة دائمة في العالم على مسافات وفترات زمنية مجهرية. وحتى في منطقة خاوية من الفضاء المكان – داخل صندوق فارغ مثلاً – فإن مبدأ عدم التيقن ينص على أن الطاقة والعزم غير مؤكدين فهما يتأرجحان بين قيم قصوى تكون كبيرة إذا كان حجم الصندوق والفترة الزمنية للاختبار صغيرين (يزدادان صغراً). وفي هذه الحالة فإن حيز الفراغ داخل الصندوق يعمل كما لو كان مدمناً "لاقتراض" الطاقة والعزم، فهو يأخذ القروض من الكون ويعيدها مرة أخرى إليه. لكن ما هو الشيء الذي يساهم في هذه التبادلات، في هذا الجزء الخالي من الفضاء الهادئ مثلاً؟ إنه كل شيء. في الحقيقة كل شيء. فالطاقة (والعزم كذلك) هي في النهاية العملة القابلة للتحويل. وتنبئنا المعادلة $E = mc^2$ أنه يمكن تحويل الطاقة إلى مادة والعكس صحيح. وهكذا إذا كان تأرجح الطاقة كبيراً بما فيه الكفاية فإنه قد يتسبب لحظياً في خروج إلكترون وجسيمته المضادة، البوزيترون، إلى الوجود، حتى لو كان هذا الجزء من الفضاء المكان فارغاً في

البداية! وحيث أن هذه الطاقة لابد أن ترد بسرعة، فإن تلك الجسيمات ستلاشي بعضها البعض بعد لحظة قصيرة لتعيد الطاقة المقترضة أثناء خروجها إلى الوجود. وينطبق نفس الشيء على كل صور الطاقة الأخرى وصور العزم - نشوء وتلاشي جسيمات أخرى، وذبذبات المجال الكهرومغناطيسي الهائج، وتأرجح مجال القوى الضعيفة والقوية - حيث يُنبئنا عدم التيقن في ميكانيكا الكم بأن الكون ساحة مزدحمة مشوشة مضطربة على المستويات المجهرية. وقد سخر فينمان مرة قائلا: "نشوء وتلاشٍ ثم نشوء وتلاشٍ، أي مضيعة للوقت"(2). وحيث أن الاقتراض ثم إعادة الدفع يلاشي كل منهما الآخر في المتوسط، لذلك فإن الجزء الخالي من الفضاء يبدو هادئاً رابط الجأش عندما نختبره بعيداً عن المستوى المجهري. ويكشف مبدأ عدم التيقن مع ذلك أن العالم الماكروسكوبي (Macroscopic) يحجب في المتوسط النشاط الزاخر على المستوى المجهري(3). وكما سنرى بعد برهة وجيزة فإن هذا الشطط هو العقبة أمام مزج النسبية العامة وميكانيكا الكم.

---

(2) Timothy Ferris, *The Whole Shebang: A State-of-The-Universe(s) Report* (New York: Simon & Schuster, 1997), p. 97.

(3) إذا كنت ما زلت متحيراً حول كيفية حدوث أي شيء في منطقة خالية من الفضاء، فمن المهم أن نتحقق من أن مبدأ عدم التيقن يضع حداً على مدى "خلاء" منطقة من الفضاء، وهو يعدل ما نعنيه بقولنا "الفضاء الخالي". فمثلاً، عند تطبيقه على اضطرابات الموجات في مجال ما (مثل الموجات الكهرومغناطيسية التي تنتقل في مجال كهرومغناطيسي) فإن مبدأ عدم التيقن يبين أن سعة الموجة والسرعة التي تتغير بها هذه السعة معرضتان لنفس العلاقة العكسية مثل موقع وسرعة الجسيمة. كلما تحددت السرعة بصورة أكثر دقة كلما كان احتمال علمنا بالسرعة التي تتغير بها سعتها أقل. والآن، عندما نقول منطقة خالية من الفضاء فإننا نعني بالضبط أنه لا توجد موجات تعبر من خلالها، وأن لكل المجالات قيمة مساوية للصفر، وذلك ضمن أمور أخرى. وبلغة معقدة لكنها في النهاية مفيدة، يمكننا إعادة صياغة ذلك بأن نقول إن سعة كل الموجات التي تعبر هذه المنطقة مساوية للصفر بالضبط. فإذا عرفنا بالضبط قيمة السعة فإن مبدأ عدم التيقن يعني أن معدل تغير السعة غير محدد بالمرة ويمكن أن يكون له أية قيمة. وإذا كانت السعة تتغير فذلك يعني أنها في لحظة تالية لن يكون مقدارها صفر، حتى لو ظلت منطقة الفضاء "خالية". ومرة أخرى، فإن المجال في المتوسط سيكون صفراً حيث أنه في بعض الأماكن ستكون السعة ذات قيمة موجبة وفي أماكن أخرى سالبة، وعندئذ لن تتغير محصلة الطاقة في المتوسط غير أن ذلك قيمة متوسطة فقط. ويعني عدم التيقن الكمي أن الطاقة في المجال - حتى في المنطقة الخالية من الفضاء - تتأرجح صعوداً وهبوطاً ويزداد مقدار التأرجح كلما صغر مقياس المسافة والزمان الذي نختبر المنطقة في حدوده. ويمكن للطاقة المتضمنة في مثل هذه التأرجحات اللحظية في المجال أن تتحول من خلال المعادلة $E=mc^2$ إلى تكون أزواج لحظية من الجسيمات والجسيمات المضادة، التي يلاشي بعضها البعض في التو لتحافظ على الطاقة من دون تغير في المتوسط.

ثانياً: نظرية مجال الكم

خلال حقبة الثلاثينيات والأربعينيات من القرن العشرين، ناضل الفيزيائيون النظريون - نذكر منهم على سبيل المثال، بول ديراك، وولفغانغ باولي، وجوليان شفينغر، وفريمان دايسون، وسين إيتيرو توموناغا، وفينمان - بلا هوادة ليكتشفوا صياغة رياضية قادرة على التعامل مع هذا الجموح المجهري. وقد وجدوا أن معادلة موجة الكم لشرودنغر الواردة في الفصل الرابع، في الواقع لم تكن إلا وصفاً تقريبياً للفيزياء المجهرية - أي أنها تقريباً تعمل بكفاءة عالية عندما لا نتعمق كثيراً في العالم الميكروسكوبي المجنون (سواء نظرياً أو تجريبياً)، لكنها تفشل بالتأكيد إذا حاولنا ذلك.

والجزء المركزي من الفيزياء الذي أهمله شرودنغر في صياغته لميكانيكا الكم هو النسبية الخاصة. وفي الواقع "حاول" شرودنغر أن يضمن النسبية الخاصة في البداية، إلا أن معادلة الكم الناتجة من ذلك كانت تعطي تنبؤات ثبت أنها متناقضة مع القياسات التجريبية للهيدروجين. وقد ألهم ذلك شردونغر أن يتناول الأمور بالتقليد الذي يقدس فعل الزمن في الفيزياء، فيتناول قسماً فقسماً للتغلب عليها - وذلك بدلاً من تناول الموضوع مرة واحدة، لنضمن كل معرفتنا من العالم الفيزيائي من أجل وضع نظرية جديدة. وغالباً ما يكون الأمر أفضل كثيراً إذا اتخذنا عدة خطوات صغيرة بصورة متعاقبة متضمنة أحدث الاكتشافات من الجبهة الأمامية للبحث العلمي. وقد بحث شرودنغر ووجد إطاراً رياضياً يشتمل على ثنائية الموجة والجسيمة المكتشفة تجريبياً، لكنه لم يضمن النسبية الخاصة في هذه المرحلة المبكرة من عمله[4].

وسرعان ما أدرك علماء الفيزياء أن النسبية الخاصة بمثابة المركز للإطار السليم لميكانيكا الكم. ويرجع ذلك إلى أن الجنون المجهري الذي لاحظناه يتطلب أن الطاقة يمكن أن تتخذ أشكالاً مختلفة - وهو مفهوم يأتي من النسبية الخاصة. وبإهمال النسبية الخاصة فإن منطلق شرودنغر قد أهمل قابلية التحول للمادة والطاقة والحركة.

(4) وبالرغم من أن المعادلة الأصلية التي صاغها شرودنغر - والتي تتضمن النسبية الخاصة - لم تصف بدقة الخواص الكمية للإلكترونات في ذرة الهيدروجين، إلا أنه سرعان ما تحققنا أنها معادلة مفيدة عند استخدامها بشكل مناسب في تطبيقات أخرى، وبالفعل ما زالت تستخدم حتى الآن. غير أنه في الوقت الذي نشر فيه شرودنغر معادلته كان أوسكار كلاين ووالتر غوردون قد سبقاه، وبذلك فقد أطلق على معادلته النسبية اسم معادلة "كلاين - غوردون".

وقد ركز علماء الفيزياء جهودهم الأولية لفتح الطريق أمام مزج النسبية الخاصة بمفاهيم الكم وذلك تطبيقاً على القوى الكهرومغناطيسية وتداخلها مع المادة. ومن خلال سلسلة من التطورات الملهمة وضعوا علم الكهربية الديناميكية الكمية. وهي مثال على ما أصبح يسمى في ما بعد بنظرية مجال الكم النسبي أو بنظرية مجال الكم اختصاراً. وهي كمية لأنها تتضمن كل الأمور المحتملة وغير المؤكدة منذ لحظة البداية؛ وهي نظرية مجال لأنها تمزج مبادئ الكم في المفاهيم الكلاسيكية السابقة عن مجال القوة - وهي في هذه الحالة مجال ماكسويل الكهرومغناطيسي. وفي النهاية هي نسبية لأنها تتضمن كذلك النسبية الخاصة من البداية. (إذا رغبت في استعارة شيء مرئي للمجال الكمي فيمكنك أن تستشهد بصورة المجال الكلاسيكي - مثل محيط من خطوط مجال غير مرئي تخترق الفضاء - لكن عليك أن تنقح هذه الصورة بطريقتين. أولاً، يجب أن تتخيل أن المجال الكمي يتكون من جسيمات مثل الفوتونات للمجال الكهرومغناطيسي. ثانياً، عليك أن تتخيل أن الطاقة على شكل جسيمات - كتل وحركتها - تتحرك جيئة وذهاباً بلا توقف من مجال كمي إلى آخر طالما أنها تتذبذب باستمرار في الفضاء والزمان).

والنظرية الكمية للكهربية الديناميكية هي، بصورة قابلة للجدال، النظرية الأكثر دقة التي حدث أن سبق تقديمها بصدد الظواهر الطبيعية. ويمكن تصور مدى دقتها في أعمال تويتشيرو كينوشيتا، عالم الفيزياء المتخصص في الجسيمات من جامعة كورنيل، الذي قام خلال الثلاثين عاما الماضية بلا كلل باستخدام الكهربية الديناميكية الكمية لحساب خواص تفصيلية معينة للإلكترونات. وقد ملأت حسابات كينوشيتا آلاف الصفحات، الأمر الذي تطلب في النهاية استخدام أقوى الحاسبات في العالم لإتمامها. ولم يذهب هذا الجهد سدى. فقد توصلت حساباته إلى تنبؤات عن الإلكترونات تحققت تجريبياً بدقة لا تتجاوز جزءاً في المليار. وهو تطابق مدهش بين الحسابات النظرية المجردة والعالم الواقعي بشكل مطلق. وقد تمكن علماء الفيزياء من خلال الكهربية الديناميكية الكمية من ترسيخ دور الفوتونات "كأصغر حزم ممكنة من الضوء" وتوضيح تداخلها مع الجسيمات المشحونة كهربياً كالإلكترونات، في إطار رياضي كامل ومقنع يمكن بواسطته إجراء التنبؤات.

وقد ألهم النجاح الذي حققته الكهربية الديناميكية الكمية علماء الفيزياء الآخرين خلال عقدي الستينيات والسبعينيات من القرن العشرين أن يحاولوا تطوير منطلق مشابه لفهم القوى الضعيفة والقوية والجاذبية من وجهة نظر ميكانيكا الكم.

وقد ثبت أن هذه الطريقة مثمرة جداً بالنسبة للقوى الضعيفة والقوية. وكما في حالة الكهربية الديناميكية الكمية، فإن علماء الفيزياء تمكنوا من وضع نظرية مجال كمية للقوى القوية والضعيفة، أطلق عليها اسم " الكرومودیناميكا الكمية" و"نظرية الكهربية الضعيفة الكمية". والاسم "الكرومودیناميكا الكمية" أكثر بهجة عن الاسم الأكثر منطقية "الديناميكا القوية الكمية"، غير أن ذلك مجرد اسم من دون أي معنى عميق. ومن ناحية أخرى فإن الاسم "الكهربية الضعيفة" يلخص علامة هامة على طريق فهمنا لقوى الطبيعة.

ومن خلال الأعمال التي أكسبت شيلدون غلاشو وعبد السلام وستيفن وينبرغ جائزة نوبل، بينوا أن القوى الضعيفة والكهرومغناطيسية متحدة طبيعياً عن طريق وصفهم النظري بالمجال الكمي، على الرغم من أن الصورة التي تظهر عليها تبدو متمايزة في العالم من حولنا. وفي النهاية، فإن مجالات القوى الضعيفة تتضاءل شدتها على جميع المستويات ما عدا المستوى تحت الذري، بينما للمجالات الكهرومغناطيسية - الضوء المرئي وإشارات الراديو والتليفزيون والأشعة السينية - تواجد ماكروسكوبي لا يقبل الجدل. غير أن غلاشو وعبد السلام ووينبرغ قد بينوا في الواقع أنه عند طاقة ودرجة حرارة مرتفعين بما فيه الكفاية - كما كان عليه الوضع في أول جزء من الثانية بعد الانفجار الهائل - فإن مجالات الكهرومغناطيسية والقوى الضعيفة تذوب بعضها في بعض لتصبح ذات خواص واحدة لا تمييز بينها، ويطلق عليها بصورة أكثر دقة "المجالات الكهربية الضعيفة". وعندما تنخفض درجة الحرارة كما يحدث بانتظام منذ لحظة الانفجار الهائل فإن كلا من القوى الكهرومغناطيسية والضعيفة تتبلور على شكل مختلف عن شكلها المشترك في درجات الحرارة العالية - من خلال عملية تعرف باسم "انكسار التماثل" (Symmetry Breaking) سنشرحها في ما بعد - ولذلك فهي تبدو مختلفة في الكون البارد الذي نعيش فيه الآن.

وهكذا، وللتاريخ، فإنه بحلول السبعينيات من القرن العشرين تم تطوير توصيف معقول وناجح من وجهة نظر ميكانيكا الكم لثلاث من القوى الأربع (القوية والضعيفة والكهرومغناطيسية)، وقد بين الفيزيائيون أن اثنتين من هذه الثلاث (الضعيفة والكهرومغناطيسية) قد جاءتا في الواقع من أصل واحد (القوى الكهربية الضعيفة). وخلال العقدين الأخيرين أخضع الفيزيائيون المعالجة الميكانيكية الكمية للقوى الثلاث (اللاجاذبية) إلى عدد هائل من التجارب الدقيقة، أثناء تداخلها بعضها مع بعض ومع جسيمات المادة التي ناقشناها في الفصل الأول. وقد واجهت النظرية كل التحديات بكل ثقة. وبمجرد أن قام التجريبيون بقياس حوالى 19 رقماً

(كتلة الجسيمات في الجدول رقم (1-1)، قوى شحنتها كما هو مسجل في الجدول الموجود في الملاحظات - الملحوظة بالفصل الأول، وشدة القوى الثلاث اللاجاذبية في الجدول رقم (1-2)، وعدد آخر قليل لن نذكره هنا) فإن العلماء النظريين وضعوا هذه الأرقام في نظريات مجالات الكم لجسيمات المادة وللقوى القوية والضعيفة والكهرومغناطيسية، فكانت النتائج التي أعقبت ذلك في ما يتعلق بالكون المجهري تتطابق بطريقة مدهشة مع النتائج التجريبية. ويصدق ذلك حتى نصل إلى الطاقة التي يمكن أن تسحق المادة إلى أجزاء من المليار من جزء من المليار من المتر، وهي الحدود التقنية الآن. ولهذا السبب يطلق الفيزيائيون على نظرية القوى الثلاث اللاجاذبية وعلى العائلات الثلاث لجسيمات المادة، النظرية القياسية أو (وهو الأغلب) النموذج القياسي لجسيمات الفيزياء.

ثالثاً: الجسيمات المراسلة

تبعاً للنموذج القياسي، وكما أن الفوتون هو أصغر مكونات المجال الكهرومغناطيسي، فإن المجالات القوية والضعيفة لها هي الأخرى مكونات أصغر. وكما شرحنا باختصار في الفصل الأول، فإن أصغر حزم القوى القوية تعرف باسم الغليونات، أما أصغر حزم القوى الضعيفة فتعرف باسم البوزونات القياسية الضعيفة (أو بشكل أدق بوزونات W، و Z) ويوجهنا النموذج القياسي للتفكير في جسيمات القوى على أنها لا تملك بنية داخلية، أي أنها في هذا الإطار تماماً جسيمات أولية مثل تلك الموجودة في العائلات الثلاث للمادة.

وتقوم الفوتونات والغليونات والبوزونات القياسية الضعيفة بتقديم الآلية المجهرية لنقل القوى التي تتكون منها. فمثلاً عندما تتنافر جسيمة مشحونة كهربياً مع أخرى لها نفس الشحنة فإنه يمكن تخيل أن كل جسيمة منهما محاطة بمجال كهربي - سحابة أو ضباب رقيق من روح الكهرباء - وتنشأ القوى التي تستشعرها كل جسيمة من التنافر بين مجالاتها الكهربية. أما الوصف المجهري الأكثر دقة للكيفية التي تتنافر بها هذه الجسيمات فمختلف بعض الشيء. يتكون المجال الكهرومغناطيسي من سرب من الفوتونات، ويتيح التداخل بين جسيمتين مشحونتين في الواقع من "دفعهما" للفوتونات جيئةً وذهاباً بينهما. وتقريباً مثل الطريقة التي تؤثر بها أنت في حركة رفيقك أثناء التزلج على الجليد بأن تقذفه أو تقذفها بوابل من كرات البولنغ، فإن جسيمتين مشحونتين كهربياً تؤثر كل منهما في الأخرى بتبادل حزم صغيرة من الضوء.

ومن أهم ما فشل فيه مثل هذا التشبيه مع المتزلجين على الجليد هو أنه في

حالة تبادل كرات البولنغ فإن الأمر دائماً "تنافر" - ودائماً يندفع المتزلجان بعيداً أحدهما عن الاخر. وعلى النقيض من ذلك، فإن جسيمتين مشحونتين شحنة مضادة تتداخلان بتبادل الفوتونات وتكون القوى الكهرومغناطيسية الناتجة هي تجاذب. ويبدو الأمر وكأن الفوتون ليس هو الناقل للقوى بذاته، ولكنه ينقل رسالة إلى المتلقي عن الكيفية التي عليه أن يتجاوب بها مع القوى المؤثرة. فبالنسبة للجسيمات متشابهة الشحنة فإن الفوتون يحمل رسالة "تفرقوا" بينما بالنسبة للجسيمات متضادة الشحنة فإن الرسالة تقول "تجمعوا". ولهذا السبب فإن الفوتونات تسمى في بعض الأحيان الجسيمات المراسلة للقوى الكهرومغناطيسية. وبالمثل فإن الغليونات والبوزونات القياسية الضعيفة هي الأخرى جسيمات مراسلة للقوى النووية القوية والضعيفة. وتنشأ القوى القوية التي تمسك بالكواركات داخل البروتونات والنيوترونات من تبادل الغليونات بواسطة الكواركات المفردة. ويمكن القول أن الغليونات في هذه الحالة بمثابة الغراء الذي يحافظ على تماسك هذه الجسيمات تحت الذرية معاً. أما القوى الضعيفة المسؤولة عن أنواع معينة من تحول الجسيمات أثناء التفكك الإشعاعي، فإنها تنتج من البوزونات القياسية الضعيفة.

رابعاً: التماثل القياسي

ربما تكون قد أيقنت أن الجاذبية هي الرجل الغريب في مناقشاتنا لقوى الطبيعة في ضوء نظرية الكم. وبناءً على نجاح الطرق التي استخدمها الفيزيائيون في حالة القوى الثلاث الأخرى، فقد يطرأ على بالك أن الفيزيائيين قد يبحثون عن نظرية مجال كمي لقوى الجاذبية - النظرية التي تعمل فيها أصغر حزمة من مجال قوى الجاذبية، اسمها الغرافيتون، كجسيمة مراسلة. ولأول وهلة، قد يبدو هذا الاقتراح بالذات ملائماً لأن نظرية مجال الكم للقوى الثلاث اللاجاذبية توضح أن هناك تشابهاً يلوح ويختفي بين هذه القوى الثلاث وسمة من سمات قوى الجاذبية التي تعرضنا لها في الفصل الثالث.

ولنسترجع معاً أن قوى الجاذبية تسمح لنا بأن نعلن أن كل الراصدين - بصرف النظر عن حركتهم - يقفون على قدم المساواة جميعاً. وحتى هؤلاء الذين نعتقد عادة أنهم يتسارعون، فإننا يمكن أن نزعم أنهم ساكنون، حيث يمكنهم أن يرجعوا القوى التي يشعرون بها إلى انغماسهم في مجال للجاذبية. وفي هذا المعنى فإن الجاذبية تقوي التماثل: فهي تؤكد على التساوي بين صحة وجهات النظر الممكنة جميعها، وكل الأطر المرجعية الممكنة. والتماثل بين القوى القوية والضعيفة الكهرومغناطيسية هو أنها جميعاً مترابطة بتماثلات تقوي من ترابطها،

وإن تكن هذه التماثلات أكثر تجريدية بوضوح من التماثل المصاحب للجاذبية.

وللإحساس بصورة تقريبية بمبادئ التماثل الدقيق، لنأخذ المثال الهام الآتي في اعتبارنا. وكما ذكرنا في الجدول 1 في الهامش رقم (1) للفصل الأول، فإن كل كوارك يأتي في شكل "ألوان" ثلاثة (يطلق عليها مجازاً أحمر وأخضر وأزرق، وليس لها علاقة بالألوان المعروفة لنا في حاسة الإبصار، بل هي مجرد أسماء). وهذه الألوان تحدد كيفية رد فعل الكواركات للقوى القوية تماماً بنفس الطريقة التي تحدد بها شحنتها الكهربية كيفية رد فعلها تجاه القوى الكهرومغناطيسية. وتؤكد كل البيانات التي حصلنا عليها أن هناك تماثلاً بين الكواركات بمعنى أن التداخل بين أي اثنتين منها لهما نفس اللون (أحمر مع أحمر، أو أخضر مع أخضر، أو أزرق مع أزرق) تكون كلها متطابقة. وبالمثل فإن التداخل بين اثنتين منها ليس لهما نفس اللون (أحمر مع أخضر، أو أخضر مع أزرق، أو أزرق مع أحمر) هي أيضا متطابقة. وفي الحقيقة فإن هذه البيانات تدعم شيئاً مدهشاً. فإذا كانت الألوان الثلاثة - الشحنات القوية الثلاث المختلفة - التي يمكن أن يحملها الكوارك قد أزيحت بشكل معين (ولنقل بلغة الألوان التي نستخدمها مجازاً، إذا أزيحت ألوان الأحمر والأخضر والأزرق إلى الأصفر والنيلي والبنفسجي مثلاً) وحتى لو كانت تفاصيل هذه الإزاحة تتغير من لحظة لأخرى أو من مكان لآخر، فإن التداخل بين الكواركات - مرة أخرى - لن يتغير أبداً. ولهذا السبب، وكما نقول بأن الكرة تمثل تماثلاً دورانياً لأنها تبدو على نفس الشكل بصرف النظر عن الكيفية التي تدور بها في أيدينا أو الكيفية التى نغير بها من زاوية نظرتنا إليها، نقول لذلك أن الكون مثال على تماثل القوى القوية: لا تتغير الفيزياء بهذه الإزاحات في شحنات القوى تلك، وهي لا تتأثر إطلاقا بها. ولأسباب تاريخية، فإن الفيزيائيين يقولون أن تماثل القوى القوية هو مثال على التماثل القياسي[5].

وهنا النقطة الأساسية، وتماماً كما في حالة التماثل بين كل نقاط الملاحظة

(5) وبالنسبة للقارئ ذي الميول الرياضية، فإننا نذكر أن مبادئ التناظر المستخدمة في فيزياء الجسيمات الأولية تقوم عموماً على مجموعات، تعرف باسم مجموعات لاي (Lie)، تنتظم الجسيمات الأولية ممثلة في مجموعات مختلفة، وعلى المعادلات التي تحكم تطورها الزمني أن تخضع لتحولات التناظر المصاحبة لها. وفي حالة القوى القوية يطلق على هذا التناظر SU(3) (المشابه للدورانات العادية في ثلاثة أبعاد، لكنها تعمل في فضاء أكثر تعقيداً)، وتتحول الألوان الثلاثة للكواركات المعنية إلى تمثيل في ثلاثة أبعاد. والإزاحة (من أحمر، وأخضر وأزرق إلى أصفر ونيلي وبنفسجي) المذكورة في المتن هي بدقة أكثر من نوع تحول SU(s) الذي يعمل على "محاور الألوان" للكوارك. أما التناظر القياسي فهو التناظر الذي تعتمد فيه تحولات المجموعة على الزمكان: في هذه الحالة، فإن "دوران" ألوان الكواركات بشكل مختلف يحدث في مواقع ولحظات مختلفة من الزمن.

التفاضلية الممكنة في النسبية العامة والتي تتطلب وجود قوى جاذبية فإن التطورات التي اعتمدت على أبحاث هيرمان ويل في العشرينيات من القرن العشرين، وشين نينغ يانغ وروبرت ميلز في الخمسينيات من القرن العشرين، قد بينت أن التماثلات القياسية ما زالت تتطلب قوى أخرى. ومثل محاولة الحفاظ على درجة الحرارة وحفظ الهواء والرطوبة في منطقة معينة ثابتين تماماً، وذلك بتعويض أي تغيير خارجي تعويضاً تاماً باستخدام نظام تحكم بيئي حساس، فطبقاً ليانغ وميلز، لابد من وجود أنواع معينة من مجالات القوى لتعوض تماماً ما يحدث من إزاحة في شحنات القوى. وبالتالي تتم المحافظة على التداخل بين الجسيمات بشكل لا يتغير أبداً. وفي حالة التماثل القياسي المصاحب لإزاحة شحنات اللون للكواركات فإن القوى المطلوبة ليست سوى القوى القوية نفسها. أي أنه بدون القوى القوية فإن الفيزياء قد تتغير بنفس نمط إزاحات شحنات الألوان الموضحة أعلاه. وتبين هذه النتيجة أنه بالرغم من اختلاف الخواص بين قوى الجاذبية والقوى القوية اختلافاً شاسعاً (تذكر مثلاً أن الجاذبية أوهن كثيراً من القوى القوية ويغطي تأثيرها مسافات عظيمة جداً) إلا أن لهما ميراثاً متشابهاً إلى حد ما: فكلاهما مطلوب لكي يتضمن الكون تماثلات معينة. وبالإضافة إلى ذلك يمكن تطبيق نفس الشيء على القوى الضعيفة والقوى الكهرومغناطيسية، موضحين أن وجودهما أيضاً مرتبط بتماثلات قياسية أخرى - ويطلق عليها التماثلات القياسية الضعيفة والكهرومغناطيسية. ولذا فإن القوى الأربع ترتبط ارتباطاً مباشراً بمبادئ التماثل.

وقد تبدو السمة العامة للقوى الأربع أنها تدل بوضوح على الاقتراح الوارد في بداية هذا الجزء. وبالتحديد، وعلى طريق جهودنا لتضمين ميكانيكا الكم في النسبية العامة، فإن علينا إيجاد نظرية لمجال الكم لقوى الجاذبية، تماماً كما اكتشف الفيزيائيون نظريات ناجحة لمجالات الكم للقوى الثلاث الأخرى. وقد ألهم هذا المنطق على مر السنين مجموعة من الفيزيائيين المتميزين وغير العاديين ليتتبعوا هذا المسار بحماس شديد، لكن ثبت أن هذا المجال مليء بالأخطار، ولم يتمكن أحد من أن يعبره بنجاح تماماً. ولنر السبب في ذلك.

خامساً: النسبية العامة في مواجهة ميكانيكا الكم

يجري استخدام النسبية العامة في الحياة العادية في المسافات الفلكية الهائلة. وبالنسبة لمسافات بهذا الشكل فإن نظرية آينشتاين تعني أن غياب الكتلة معناه تسطح الفضاء كما يوضح الشكل رقم (3-3). وللربط بين النسبية العامة وميكانيكا الكم لابد من أن نغير من بؤرة اهتمامنا بشكل حاد ونختبر الخواص المجهرية

الميكروسكوبية للمكان. وقد أوضحنا ذلك في الشكل رقم (5-1)، وذلك بتقريب وتكبير مناطق صغيرة جداً في نسيج الفضاء. وعند بداية التقريب لن يحدث شيء كما نرى في المستويات الثلاثة الأولى للتكبير في الشكل رقم (5-1)حيث تحتفظ بنية الفضاء بشكلها الأساسي. ومن منطلق كلاسيكي بحت فإننا قد نتوقع أن الصورة الهادئة والمنبسطة للفضاء ستصمد حتى نصل إلى مقاييس صغيرة الطول. غير أن ميكانيكا الكم ستغير هذه النتيجة جذرياً. "فكل شيء" معرض للتأرجحات الكمية المتأصلة في مبدأ عدم التيقن - حتى مجال الجاذبية. وعلى الرغم من أن المنطق الكلاسيكي يتضمن أن الفضاء الخالي له مجال جاذبية مساوٍ للصفر، فإن ميكانيكا الكم تبين أن قيمة المجال المتوسطة هي صفر لكن القيمة الفعلية تتأرجح لأعلى ولأسفل نتيجة التأرجح الكمي. والأكثر من ذلك، فإن مبدأ عدم التيقن ينبئنا بأن مدى التأرجح في مجال الجاذبية يزداد كلما زاد تركيز انتباهنا على مناطق أصغر في الفضاء المكان. وتوضح ميكانيكا الكم أنه لا شيء يفضل البقاء محصوراً في مكان ضيق، ويؤدي تضييق الفضاء إلى مزيد من التأرجحات.

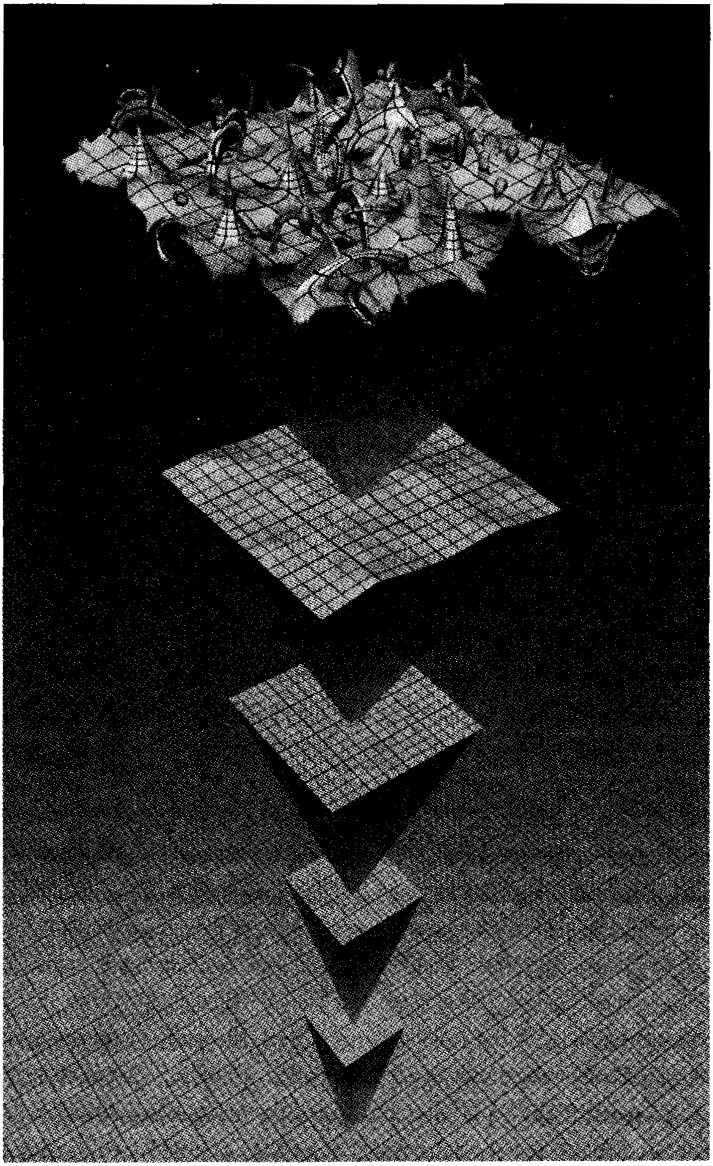
ولأن مجالات الجاذبية تظهر على شكل تحدب، فإن التأرجحات الكمية تظهر نفسها كتشوهات متزايدة العنف للفضاء للمكان المحيط. ونحن نرى بصيصاً من هذه التشوهات يبزغ في المستوى الرابع للتكبير في الشكل رقم (5-1). وباختبار مستويات من المسافات الأقل كما يبين المستوى الخامس في الشكل رقم (5-1)، فإننا نرى أن التأرجح العشوائي الكمي في مجال الجاذبية يقابله اعوجاج شديد في الفضاء بحيث لم يعد يمثل جسماً هندسياً ذا انحناءات رقيقة كما في حالة مثال الغشاء المطاطي الذي أوردناه في الفصل الثالث. وهو يتخذ بالأحرى شكلاً رغوياً هائجاً ملتوياً كما هو مبين بالجزء الأعلى من الشكل. وقد صك جون ويلر مصطلح "الرغوة الكمية" ليصف الجنون الذي بينه الفحص فوق المجهري للمكان (وللزمان) - ويصف هذا مملكة غير مألوفة للكون حيث تفقد المفاهيم المتفق عليها لليسار واليمين وللأمام والخلف ولأعلى وأسفل (بل وحتى مفهوم قبل وبعد) معناها. وعلى مثل هذه المقاييس للمسافات الصغيرة فإننا نرى عدم التوافق الأساسي بين النسبية العامة وميكانيكا الكم. وقد "حطمت التأرجحات الكمية العنيفة التي تظهر عند مقاييس المسافات الصغيرة مفهوم الشكل الهندسي الفضائي الهادئ الذي هو المبدأ المحوري في النسبية العامة". وعلى المقاييس فوق المجهرية فإن السمة المحورية لميكانيكا الكم - مبدأ عدم التيقن - تتناقض مباشرة مع السمة المحورية للنسبية العامة - نموذج الفضاء المكان الهندسي الهادئ (والزمكان).

وعملياً يقحم هذا التناقض نفسه في كل أمر أساسي. فالحسابات التي تمزج بين معادلات النسبية العامة وميكانيكا الكم تؤدي بالضرورة إلى نفس الإجابة غير المنطقية: ما لا نهاية. وتشبه الإجابة بما لا نهاية أثراً حاداً تركه معلم من الطراز القديم لينبئنا بأننا نرتكب خطأً جسيماً[6]. ولا تستطيع معادلات النسبية العامة أن تتعامل مع الجنون الغاضب للرغوة الكمية.

ومع ذلك فإننا نلاحظ عندما نتراجع إلى مسافات أكثر اعتيادية (بالسير مع التتابع المرسوم في الشكل رقم (5-1) في الاتجاه العكسي)، أن التأرجحات العشوائية العنيفة الصغيرة تلاشي بعضها البعض - تماماً بنفس الطريقة التي لا يُظهِر بها كشف الحساب البنكي لمدمن الاقتراض هذا الإدمان - ويصبح المفهوم الهندسي الهادئ لنسيج الكون مرة أخرى دقيقاً. ويشبه ذلك تماماً ما تراه عندما تنظر إلى صورة مركبة من شبكة من النقاط: فإذا نظرت من بعيد فإن النقاط المكونة للصورة تمتزج بعضها مع بعض لتعطي الانطباع بصورة ناعمة تتغير فيها مناطق الإضاءة بهدوء وبلطف. أما إذا فحصت الصورة عن قرب أكثر، فإن الأمر سيختلف بشكل ملحوظ عن تلك الصورة الناعمة التي تظهر عند النظر من مسافات بعيدة. وليس الأمر سوى مجموعة من النقاط غير المترابطة كل منها منفصلة عن الأخرى. لكن لاحِظْ هنا أنك أدركت الطبيعة المنفصلة للصورة فقط عندما اختبرتها عن قرب، أما عن بعد فإنها تبدو ناعمة. وبالمثل فإن نسيج الزمكان يبدو ناعماً إلا إذا اختبرناه بدقة فوق مجهرية. وهذا هو السبب في أن النسبية العامة تنطبق على مقاييس مسافات كبيرة بما فيه الكفاية (وأزمنة) - المقاييس المناسبة للكثير من الاستخدامات الفلكية العادية - لكنها تصبح غير متماشية عند مقاييس المسافات القصيرة (والأزمنة). وتصدق المقولة المحورية للتحدب الهندسي الرقيق الناعم على المقاييس الكبيرة، لكنها تتحطم نتيجة للتأرجحات الكمية عندما نطبقها على المقاييس الصغيرة.

(6) أثناء تطوير نظريات الكم للقوى اللاجاذبية الثلاث، توصل الفيزيائيون إلى حسابات جاءت بنتائج لانهائية. وبمرور الوقت، أيقنوا بالتدريج أنه يمكن الاستغناء عن هذه اللانهائيات باستخدام وسيلة تعرف باسم "إعادة التطبيع Renormalization". واللانهائيات التي ظهرت من محاولات دمج النسبية العامة مع ميكانيكا الكم كبيرة جداً ولا تخضع لعملية العلاج بإعادة التطبيع. وقد أدرك الفيزيائيون حديثاً أن الإجابات اللانهائية إشارة إلى أن النظرية المستخدمة في تحليل شيء ما تقع خارج نطاق استخداماتها. وحيث أن الهدف من الأبحاث الحالية هو إيجاد نظرية لها مجال في التطبيق غير محدود في الأساس - النظرية الأخيرة Ultimate أو النهائية Final - فإن الفيزيائيين رغبوا في الحصول على نظرية لا تشاغلهم فيها إجابات بما لا نهاية، بصرف النظر عن مدى تطرف النظام الفيزيائي موضع التحليل.

الشكل رقم (5-1)



بالتكبير المتتابع لمنطقة من الفضاء المكان، يمكن فحص الخواص فوق المجهرية. وتصطدم محاولات مزج النسبية العامة وميكانيكا الكم بالرغوة الكمية العنيفة التي تبزغ عند أعلى مستوى للتكبير.

وتسمح لنا المبادئ الأساسية للنسبية العامة وميكانيكا الكم بحساب المقاييس التقريبية للمسافات التي علينا أن ننزل إلى أصغر منها لتظهر الظاهرة الغريبة الموجودة في الشكل رقم (5-1). ويتضافر كل من صغر ثابت بلانك - الذي يتحكم في شدة التأثيرات الكمية - والضعف الذاتي لقوى الجاذبية ليعطيا ما يعرف باسم "طول بلانك" الذي من الصغر بحيث لا يمكن تخيله: فهو جزء من المليون من جزء من المليار من جزء من المليار من جزء من المليار من السنتيمتر (10^{-33} سم)[7]. ويظهر المستوى الخامس في الشكل رقم (5-1) بشكل تخطيطي المستوى فوق المجهري، عند مسافات أصغر من طول بلانك للكون. ولتقريب الإحساس بهذه المسافات فإننا إذا قمنا بتكبير ذرة واحدة إلى حجم مساوٍ لحجم الكون المعروف لنا، فإن طول بلانك لن يتجاوز ارتفاع شجرة متوسطة.

وهكذا يصبح عدم التوافق بين النسبية العامة وميكانيكا الكم واضحاً فقط في جزء صغير من الكون (مستوى محدود من الكون). ولهذا السبب قد تتساءل عما إذا كان ذلك يستحق المعاناة؟ وفي الحقيقة فإن مجتمع الفيزياء لا يتخذ موقفاً موحداً عند تناول هذا الموضوع. فهناك فيزيائيون يعترفون بوجود المشكلة لكنهم يتجاوزونها ويستخدمون ميكانيكا الكم والنسبية العامة في تناول المشكلات التي تتعلق بالأطوال الأكبر كثيراً من طول بلانك، كما تتطلب ذلك أبحاثهم. إلا أنه هناك فيزيائيون آخرون لا يرتاحون تماماً لحقيقة التناقض الأساسي العميق بين الركيزتين الأساسيتين المعروفتين لنا في الفيزياء، بصرف النظر عن المسافات فوق المجهرية التي يجب اختبارها للكشف عن المشكلة. وهم يقولون إن عدم التطابق

(7) يمكن فهم طول بلانك بالاعتماد على المنطق البسيط المتأصل في ما يسميه الفيزيائيون تحليل الوحدات. والفكرة هي كما يلي: عندما تصاغ نظرية كمجموعة من المعادلات فإن الرموز المجردة لا بد من أن ترتبط بسمات العالم الفيزيائية إذا كان لهذه النظرية أن تكون على صلة بالواقع. وبالتحديد لا بد من إدخال نظام للوحدات بحيث، مثلاً، لو كان الرمز يعني الطول، فإن لدينا مقياساً يمكن بواسطته فهم قيمته. وفي النهاية، إذا أظهرت المعادلة أن الطول موضع النقاش هو 5، فإن علينا أن نحدد هل هو 5 سم، أم 5 كم، أو 5 سنوات ضوئية ... الخ. وفي نظرية تتضمن النسبية العامة وميكانيكا الكم، ينبع اختيار الوحدات بشكل طبيعي على النحو التالي: هناك ثابتان للطبيعة تعتمد عليهما النسبية العامة: سرعة الضوء c وثابت نيوتن للجاذبية G. تعتمد ميكانيكا الكم على ثابت واحد للطبيعة هو $\hbar$. وبفحص وحدات هذه الثوابت (مثلاً c سرعة واتجاه يعبر عنها بالمسافة مقسومة على الزمن، وهكذا)، يمكن للمرء أن يرى أن الحد $\sqrt{\hbar G/c^3}$ له أبعاد الطول، وهو في الحقيقة $1.616x10^{-33}$ سم. وهذا هو طول بلانك. وحيث أنه يتضمن مُدخَلات للجاذبية والزمكان (G وc) ويعتمد كذلك على ميكانيكا الكم ($\hbar$) فإنه يعد الأمر لقياس - الوحدة الطبيعية للطول - في أية نظرية تحاول دمج النسبية العامة وميكانيكا الكم. وعندما نستخدم مصطلح "طول بلانك" في متن الكتاب، فإننا غالباً ما نعني بشكل تقريبي، أننا نشير إلى طول في حدود 10^{-33} سم.

يشير إلى عيب أساسي في فهمنا للعالم الفيزيائي. ويعتمد هذا الرأي على وجهة نظر غير مثبتة لكنها محسوسة بشدة بأن الكون، إذا فهمناه على أعمق مستوياته وأكثرها أولية، يمكن وصفه بواسطة نظرية تبدو منطقية متجانسة الأجزاء. وبالتأكيد، وبصرف النظر عن مدى محورية عدم التوافق هذا في أبحاثهم، فإن معظم الفيزيائيين يجدون من الصعب تصديق أن الفهم النظري للكون يتشكل من خليط متنافر رياضياً لإطارين قويين لكنهما متعارضان.

وقد قام الفيزيائيون بمحاولات عديدة لتنقيح النسبية العامة أو ميكانيكا الكم بشكل أو بآخر لتجنب هذا التناقض. وعلى الرغم من أن هذه المحاولات كانت جريئة وعبقرية إلا أنها باءت بالفشل الواحدة تلو الآخرى.

كان هذا سائداً حتى اكتشاف نظرية الأوتار الفائقة[8].

(8) بالإضافة إلى نظرية الأوتار هناك حالياً منطلقان اثنان يحاولان دمج النسبية العامة مع ميكانيكا الكم. المنطلق الأول يتزعمه روجر بنروز من جامعة أكسفورد ويطلق عليه نظرية تويستر (Twistor Theory) أو نظرية الإعصار. أما المنطلق الثاني - الذي جاء بإلهام من أبحاث بنروز - فيتزعمه أبهاي أشتيكار من جامعة ولاية بنسلفانيا ويعرف باسم طريقة المتغيرات الجديدة (New Variables Method). ومع أننا لن نناقش هذين المنطلقين في هذا الكتاب، إلاّ ان هناك توقعات متزايدة بأن يكونا مرتبطين ارتباطاً عميقاً بنظرية الأوتار، وأنهما بالتآزر مع نظرية الأوتار قد يشحذان الطريق إلى نفس الحل لمعضلة دمج النسبية العامة مع ميكانيكا الكم.

القسم الثالث

السيمفونية الكونية

الفصل السادس

لا شيء سوى الموسيقى:
أساسيات نظرية الأوتار الفائقة

لقد وفرت الموسيقى منذ زمن بعيد الاستعارات الممتازة إلى الذين أعملوا فكرهم لأجل حل معضلات متعلقة بالكون، ومن "موسيقى الكرات" الفيثاغورثية العتيقة إلى "تجانس الطبيعة" التي حكمت الأبحاث عبر العصور، بحثنا مجتمعين في أغنية الطبيعة عن التجوال الرقيق للأجرام السماوية وفي الانفجارات الصاخبة للجسيمات تحت الذرية. وباكتشاف نظرية الأوتار الفائقة اتخذت التعبيرات الموسيقية المجازية منحىً مدهشاً واقعياً، حيث تقترح النظرية أن المشهد المجهري تغمره أوتار دقيقة، تتحكم أنساق اهتزازاتها في تطور الكون. وتهب رياح التغيير وفقاً لنظرية الأوتار الفائقة، عبر كون إيولي(*).

وعلى النقيض فإن النموذج القياسي يرى المكونات الأولية للكون كتركيبات نقطية ليس لها بنية داخلية. وعلى الرغم من قوة هذا المنطلق إلا أن النموذج القياسي لا يمكن أن يكون كاملاً أو نظرية نهائية لأنه لا يتضمن الجاذبية (وكما ذكرنا سابقاً، فإن كل تنبؤ للنموذج القياسي عن العالم المجهري أمكن التحقق منه بصورة أساسية حتى جزء من المليار من جزء من المليار من المتر، وهذا هو حد الدقة التقنية في الوقت الحاضر). وفوق ذلك، فإن محاولات تضمين الجاذبية داخل إطار ميكانيكا الكم قد فشلت بسبب التأرجحات العنيفة في النسيج الفضائي المكاني والتي تظهر في المسافات فوق المجهرية، أي عند أطوال أقصر من طول بلانك. وقد أجبرنا هذا التعارض الذي لم يجد حلاً على أن نبحث في اتجاه أعمق لفهم الطبيعة. في العام 1984 قدم كل من الفيزيائي مايكل غرين من كلية كوين ماري في ذلك الوقت، وجون شوارتز من معهد كاليفورنيا للتقنية، أول بحث مقنع حول نظرية الأوتار الفائقة (نظرية الأوتار، للاختصار) يمكن أن يعطينا ما نرجوه من فهم.

(*) نسبة إلى إيول، إله الريح عند الإغريق والرومان (المترجم والمراجع).

تقدم نظرية الأوتار تعديلاً مدوياً وجديداً للوصف النظري للخواص فوق المجهرية للكون - وهو التعديل الذي تحقق منه الفيزيائيون ببطء، وعدل من النسبية العامة لآينشتاين بالشكل الذي جعلها تتفق تماماً مع قوانين ميكانيكا الكم. ووفقا لنظرية الأوتار فإن العناصر الأولية للكون ليست جسيمات نقطية. بل هي فتائل دقيقة أحادية البعد تشبه الحلقة المطاطية المتناهية الصغر في سمكها والتي تهتز جيئةً وذهاباً. ولا تنخدع بهذا الاسم: فعلى عكس أي قطعة عادية من الوتر الذي يتكون هو نفسه من جزيئات وذرات، فإن الأوتار في نظرية الأوتار توجد في أعماق المادة. وتقترح النظرية أنها عناصر فوق مجهرية تتكون منها الجسيمات الأولية التي تتكون منها الذرات. والأوتار في نظرية الأوتار من الصغر - يصل طولها في المتوسط إلى طول بلانك تقريباً - لدرجة أنها تظهر كنقاط حتى لو فحصناها بأقوى ما نملك من أجهزة قياس.

ويؤدي الإحلال المباشر للجسيمات (على شكل نقاط) محل جدائل من الأوتار كعناصر أساسية لكل شيء إلى تتابع نتائج بعيدة المدى. أولاً والأهم، يبدو أن نظرية الأوتار تزيل التناقض بين النسبية العامة وميكانيكا الكم. وكما سنرى فإن الطبيعة الفراغية المتمددة للوتر هي العنصر الحرج الجديد الذي يسمح بإطار فريد متجانس يربط بين النظريتين. ثانياً، تقدم نظرية الأوتار بالفعل نظرية موحدة تقترح أن كل المادة وكل القوى تنشأ من مكون أساسي واحد: هو الأوتار المتذبذبة. وأخيرا، وكما سنناقش في الفصول القادمة بتفاصيل أكثر، وعدا تلك الإنجازات الواضحة، فإن نظرية الأوتار تغير مرة أخرى وبصورة جذرية من فهمنا للزمكان[1].

أولاً: موجز تاريخ نظرية الأوتار

في العام 1968، كان عالم الفيزياء النظري الشاب غابرييل فينزيانو يحاول جاهداً أن يفهم الخواص التجريبية المختلفة التي لاحظها للقوى النووية القوية. كان فينزيانو وقتها يعمل مساعد باحث في CERN مختبر التسريع الأوروبي في جنيف بسويسرا، ويجري أبحاثه على الأمور التي تتعلق بهذه المشكلة لعدة سنوات، إلى أن توصل في أحد الأيام إلى كشف مذهل. ولدهشته، فقد تحقق من أن هناك معادلة معروفة للقلة فقط وضعها الرياضي السويسري البارز ليونارد يولر لغرض رياضي بحت منذ حوالى مائتي سنة - واسمها معادلة بيتا الخاصة بيولر -

(1) سيعرف القارئ ذو الخبرة أننا نركز في هذا الفصل على نظرية الأوتار "الاضطرابية"، بينما سنناقش السمات اللااضطرابية في الفصلين 12 و13.

ويبدو أنها تصف العديد من خواص الجسيمات المتداخلة بقوة في خطوة واحدة. وقد زودتنا ملاحظات فينزيانو بإطار رياضي قوي للعديد من خواص القوى القوية، وأطلقت عدداً هائلاً من البحوث هدفها استخدام معادلة بيتا الخاصة بيولر وتصميمات عديدة أخرى لوصف الكم الهائل من البيانات التي جمعها المشتغلون بالذرة من جميع أنحاء العالم. غير أنه كان هناك شعور بأن ملاحظات فينزيانو غير كاملة. وكان الأمر يشبه طالباً يحفظ المعادلات عن ظهر قلب ويستخدمها من دون أن يفهم معناها أو الغرض منها. بدا أن معادلة بيتا صالحة للاستخدام لكن لا يعرف أحدٌ لماذا؟ كانت معادلة تحتاج إلى تفسير. تغير الأمر في 1970 عندما قام كل من يوتيشيرو نامبو من جامعة شيكاغو، وهولغر نيلسن من معهد نيلز بوهر، وليونارد سوسكيند من جامعة ستانفورد بالكشف عن فيزياء خفية غير معروفة في ذلك الوقت وراء معادلة يولر. وقد بين هؤلاء الفيزيائيون أنه إذا وضعنا نموذجاً للجسيمة الأولية صغيراً مثل أوتار أحادية البعد متذبذبة، فإن تداخلاتها النووية يمكن أن تصفها معادلة يولر بدقة. وإذا كانت قطع الأوتار صغيرة جداً فإنها ستبدو كنقاط وسيتمشى ذلك مع المشاهدات التجريبية.

ومع أن ذلك قد قدم نظرية حدسية بسيطة وسارَّة، فإنه لم يمض وقت طويل قبل سقوط الوصف الوتري للقوى القوية. وفي بداية السبعينيات من القرن العشرين أظهرت التجارب عالية الطاقة القادرة على سبر العالم تحت الذري بعمق أكثر، أظهرت أن النموذج الوتري جاء بعدد من التنبؤات تتناقض مباشرة مع المشاهدات. وفي نفس الوقت كانت نظرية مجال كم الجسيمات النقاط الخاصة بكروموديناميكية الكم قد أخذت تتطور، وأدى نجاحها الساحق في شرح القوى القوية إلى رفض نظرية الأوتار.

وقد اعتقد أغلب الفيزيائيين من علماء الجسيمات أن نظرية الأوتار قد ألقيت في سلة مهملات العلم، غير أن القليل الدؤوب منهم ظل متمسكاً بها. فقد شعر شوارتز مثلاً بأن "البنية الرياضية لنظرية الأوتار كانت فائقة الجمال وتحتوي على خواص إعجازية يمكن أن تؤدي إلى شيء ذي قيمة"[(2)]. كانت إحدى المشاكل التي لاحظها الفيزيائيون أن بها غنى أكثر من اللازم. وقد تضمنت النظرية أشكالاً من الوتر المتذبذب لها خواص قريبة من خواص الغليونات، مجسدة حقها المبكر في أن تصبح نظرية القوى القوية. ولكن عدا ذلك فإنها تضمنت جسيمات إضافية تشبه المرسال، بدا وكأنها لا دور لها في الملاحظات التجريبية حول القوى القوية.

(2) مقابلة مع جون شوارتز، في 23 كانون الأول/ ديسمبر 1997.

ففي العام 1974 قام شوارتز وجول تشيرك من دار المعلمين العليا (Ecole Normale Supérieure) بخطوة جريئة حولت هذه النقيصة الظاهرية إلى فضيلة. وبعد دراسة النسق المحير شبيه المرسال لتردد الوتر، أيقنوا أن خواصها تتفق تماماً مع تلك الجسيمات المراسلة المفترضة لقوى الجاذبية - الغرافيتون. ومع أن أحداً لم ير على الإطلاق هذه "الحزم متناهية الصغر" لقوى الجاذبية، إلا أن النظريتين يمكن أن تتنبآ بكل ثقة بصفات أساسية معينة لها. وقد اكتشف تشيرك وشوارتز أن هذه الصفات تتحقق بالضبط بواسطة أنساق اهتزازية معينة. وبناءً على ذلك، أيقن تشيرك وشوارتز أن السبب وراء فشل نظرية الأوتار في المحاولات الأولى هو أن الفيزيائيين قد حصروا أو قيدوا بشكل غير ملائم مجال هذه النظرية. وقد أعلنوا أن نظرية الأوتار ليست مجرد نظرية للقوى القوية، ولكنها نظرية كم تتضمن الجاذبية أيضا[3].

لم يستقبل مجتمع الفيزياء هذا الاقتراح بحماس جارف. وفي الحقيقة يتذكر شوارتز ذلك قائلا: "لقد أهملت أبحاثنا على مستوى العالم"[4]. كان مسار التقدم العلمي يغص بالعديد من المحاولات الفاشلة لربط الجاذبية بميكانيكا الكم. وقد تبين أن نظرية الأوتار هي الأخرى فاشلة في محاولاتها الأولى لوصف القوى القوية، وأنه من غير المعقول أن نحاول استخدامها لمتابعة هدف أعظم. وقد أظهرت دراسات يائسة ومتتابعة خلال أواخر السبعينيات وأوائل الثمانينيات من القرن العشرين أن كلا من نظرية الأوتار وميكانيكا الكم تعاني من تناقضاتها الخاصة. وبدا الأمر وكأن قوى الجاذبية قد قاومت مرة أخرى انضواءها تحت التوصيف المجهري للعالم.

كان هذا هو الحال حتى العام 1984، حين بيّن غرين وشوارتز أن التعارض الكمي مع نظرية الأوتار يمكن حله، وذلك في بحث يمثل نقطة هامة حددت نهاية اثني عشر عاماً من العمل المضني في البحوث التي كانت مهملة بشكل كبير ومرفوضة تماماً من معظم الفيزيائيين. وفوق ذلك، فقد بيَّنا أن النظرية الناتجة لها اتساع كافٍ ليحتوي كل القوى الأربع وكل المادة كذلك. وبمجرد ظهور وانتشار هذا البحث عبر مجتمع الفيزياء العالمي، تخلى المئات من فيزيائيي الجسيمات عن مشروعات أبحاثهم ليطلقوا هجومهم الشرس في مواجهة ما بدا وكأنه المعركة النظرية الأخيرة في مجال البحث القديم حول كنه أعمق أساليب عمل الكون.

(3) قُدّمت اقتراحات مماثلة وبشكل مستقل بواسطة تامياكي يونيا وكوركوت باراداكس ومارتن هالبرن. كذلك ساهم الفيزيائي السويدي لارس برينك بشكل ملحوظ في التطور المبكر لنظرية الأوتار.

(4) مقابلة مع جون شوارتز، في 23 كانون الأول/ ديسمبر 1997.

لقد بدأت دراساتي العليا في جامعة أكسفورد في تشرين الأول/أكتوبر 1984، وعلى الرغم من أنني كنت متحفزاً لدراسة ما يتعلق بنظرية مجال الكم، والنظرية القياسية، والنسبية العامة إلا أنه كان هناك شعور سائد بين الخريجين القدامى بأنه لا مستقبل لفيزياء الجسيمات، أو على الأقل أن مستقبلها غامض. كان النموذج القياسي قد اتخذ وضعه وكان نجاحه الملحوظ في التنبؤ بالنتائج التجريبية يشير إلى أن التحقق منه مسألة وقت وتفاصيل لا أكثر. وإذا ذهبنا أبعد من تلك الحدود ليتضمن النموذج القياسي الجاذبية وإمكانية شرح المُدْخَلات التجريبية التي بني عليها - الأرقام التسعة عشر التي تلخص كتلة وشحنة قوى الجسيمات الأولية وشدتها النسبية، وهي تلك الأعداد التي تحددت بالتجارب لكنها لم تفهم نظرياً - فإن ذلك كان أمراً شاقاً جعل كل الفيزيائيين ما عدا الأكثر شجاعة يتخلون عن هذا التحدي. لكن بعد ستة أشهر انقلب الوضع تماماً. فقد نفذت نجاحات غرين وشوارتز حتى إلى خريجي السنة الأولى. وقد غمر الجميع إحساس أخاذ بأنهم في لحظة فاصلة من تاريخ الفيزياء، وحل هذا الإحساس محل الضجر والملل السابق. وقام عدد منا بالعمل الدؤوب ليل نهار في محاولة السيطرة على آفاق الفيزياء النظرية والرياضيات المجددة المطلوبة لفهم نظرية الأوتار.

عرفت الفترة بين 1984 و1986 "بالثورة الأولى للأوتار الفائقة". وقد نشر الفيزيائيون من جميع أنحاء العالم أكثر من ألف بحث خلال هذه السنوات حول نظرية الأوتار. أظهرت هذه الأبحاث بما لا يدع مجالاً للشك أن السمات العديدة للنموذج القياسي - السمات التي اكتشفت بعد عناء شديد على مدى عقود من الأبحاث - قد انبثقت ببساطة وبشكل طبيعي من البنية العظيمة لنظرية الأوتار. وقد قال مايكل غرين "في اللحظة التي تواجهك فيها نظرية الأوتار وتتحقق من أن كل التطورات العظمى في الفيزياء تقريباً على مدار المائة سنة الأخيرة تنبثق - وتنبثق بأناقة - من مثل نقطة البداية البسيطة تلك، ستتيقن من أن هذه النظرية الخارقة بشكل غير معقول فريدة لا نظير لها"[5]. وفوق ذلك، فإن نظرية الأوتار تقدم، كما سنرى في ما بعد، ولتلك السمات الواردة أعلاه، تفسيرات أكثر إقناعاً وشمولية من تلك الموجودة في النموذج القياسي. وقد أقنعت هذه التطورات الكثير من الفيزيائيين بأن نظرية الأوتار في طريقها لتحقيق ما وعدت به بأن تصبح النظرية الموحدة النهائية.

وعلى الرغم من ذلك اصطدم منظرو نظرية الأوتار مرات عديدة بعقبات

(5) مقابلة مع مايكل غرين، في 20 كانون الأول/ديسمبر 1997.

خطيرة. وغالباً ما يواجه المرء في أبحاث الفيزياء النظرية معادلات من الصعوبة بمكانٍ فهمها أو تحليلها. لكن عادة لا يستسلم الفيزيائيون، بل يحاولون حل هذه المعادلات بصورة تقريبية: والوضع في حالة نظرية الأوتار أكثر صعوبة. وقد ثبت أنه حتى مجرد تحديد "المعادلات نفسها" أمر صعب لدرجة أن الصور التقريبية فقط منها هي ما يمكن استنتاجه حتى الآن. وبهذا الشكل فإن منظري نظرية الأوتار قد اقتصر جهدهم على إيجاد حلول تقريبية لمعادلات تقريبية. وبعد سنوات قليلة من هذا التقدم المذهل خلال ثورة الأوتار الفائقة الأولى، وجد الفيزيائيون أن التقريبات المستخدمة غير ملائمة للإجابة عن عدد من التساؤلات الأساسية التي تعوق التطور بعد ذلك. وأصبح الكثير من الفيزيائيين المشتغلين بنظرية الأوتار أكثر إحباطاً، وقرروا العودة إلى مجالات أبحاثهم السابقة لأنه لم يقدم أحد أي مقترحات أساسية لتخطي هذه الطرق التقريبية. وأصبحت السنوات من أواخر الثمانينيات حتى أوائل التسعينيات من القرن العشرين فترة محاولات بالنسبة لمن قرر الاستمرار منهم. ومثل كنز من الذهب مغلق بإحكام في مكان أمين يمكن رؤيته من خلال ثقب باب يغريك بالنظر، لكن لا أحد يملك مفتاحه، كانت نظرية الأوتار بجمالها وما تعد به هي ذلك الكنز، وكانت الاكتشافات الهامة تتخلل دورياً فترات الجفاف الطويلة، لكن كان واضحاً للجميع في هذا المجال أن الأمر يتطلب طرقاً جديدة لها المقدرة على تخطي التقريبات السابقة.

أعلن إدوارد ويتن خطة للقيام بالخطوة التالية، وذلك في محاضرة أخاذة في مؤتمر عن الأوتار عام 1995 عُقد في جامعة جنوب كاليفورنيا - وهي المحاضرة التي أدهشت قاعة غصت بأعظم فيزيائيي العالم، مشعلاً بذلك "ثورة الأوتار الفائقة الثانية". وحتى لحظة خروج هذا الكتاب للنور ما زال منظرو نظرية الأوتار يعملون بهمة بالغة في صياغة وتطوير مجموعة من الطرق الجديدة التي تعد بالتغلب على الصعوبات النظرية السابقة. وستتعرض المقدرة التقانية لعالم منظري نظرية الأوتار لصعوبات في طريقها، لكن النور في آخر النفق، على الرغم من أنه ما زال بعيداً، فقد يصبح مرئياً في النهاية.

في هذا الفصل، وفي عدد من الفصول سيأتي في ما بعد، سنتعرض لمفهوم نظرية الأوتار التي انبثقت من الثورة الأولى للأوتار الفائقة وما تلاها من أبحاث سبقت الثورة الثانية للأوتار الفائقة. وسنشير أحياناً إلى أفكار جديدة تشعبت عن الثورة الثانية؛ أما مناقشة أحدث ما ظهر من أبحاث فسيجيء ذكره في الفصلين الثاني عشر والثالث عشر.

ثانياً: هل هي، مرة أخرى، الذرات الإغريقية؟

كما ذكرنا في بداية هذا الفصل وأوضحنا في الشكل رقم (1-1)، فإن نظرية الأوتار تزعم أنه إذا أمكن اختبار الجسيمات - النقاط المفترضة في النموذج القياسي بدقة تفوق مقدرتنا الحالية، فإن كل نقطة ستبدو وكأنها مصنوعة من حلقة من وتر مفرد دقيق ومتذبذب.

ولأسباب ستتضح في ما بعد، فإن طول حلقة الوتر العادية تقريباً هو طول بلانك، أي أصغر من نواة الذرة بمقدار مائة مليار مليار مرة (10^{20} مرة). وليس مستغرباً أن تجاربنا في هذه الأيام لا تستطيع اكتشاف الطبيعة الوترية المجهرية للمادة: فالأوتار متناهية الدقة حتى بالمقاييس الخاصة بالجسيمات تحت الذرية. وقد يتطلب الأمر معجلاً ليدفع المادة للتجمع بطاقة تبلغ حوالى مليون مليار مرة أكثر من أي معجل سبق بناؤه لنتمكن من الكشف عن أن الوتر ليس جسيمة - نقطة.

وسنقوم حالاً بوصف التضمينات المذهلة التي نتجت من إحلال الأوتار محل الجسيمات النقاط، لكن دعنا أولاً نثير سؤالاً أساسياً جداً: من أي شيء صنعت الأوتار؟

هناك إجابتان محتملتان لهذا السؤال. الأولى، أن الأوتار مادة أولية حقيقة - فهي "ذرات" Atoms، "مكونات غير قابلة للانقسام"، بالمعنى الحقيقي الذي قصده الإغريق القدامى. ولأنها أصغر المكونات إطلاقاً لأي شيء ولكل شيء فإنها تمثل آخر الطريق - مثل آخر عروسة في الماتروشكا الروسية(*) - في الطبقات المتعددة لبنية العالم المجهري. ومن هذا المنظور، وبالرغم من أن الأوتار تشغل حيزاً مكانياً، فإن السؤال عن تركيبتها ليس له معنى. فإذا كانت الأوتار تتكون من شيء أصغر فإنها لن تكون أساسية. وبدلاً من ذلك، فإن أي شيء يمكن أن تتكون منه الأوتار سيحل مباشرة محلها كمادة أكثر أساسية في تكوين الكون. وباللجوء إلى التشبيه مع اللغة، فإن الفقرات تتكون من الجمل وتتكون الجمل من الكلمات وتتكون الكلمات من الحروف. ومم يتكون الحرف؟ من المنطلق اللغوي، فإن الحرف هو نهاية الطريق. والحروف هي الحروف - أي اللبنات الأساسية للغة المكتوبة، ولا توجد بنية أبعد من ذلك. والتساؤل مم تتركب الحروف ليس له معنى. وبالمثل فإن الوتر ببساطة هو الوتر - حيث لا يوجد شيء أكثر أساسية

(*) سلسلة من العرائش الخشبية تدخل بعضها في البعض لتنتهي بآخر عروسة لا تضم شيئاً بعدها (المترجم والمراجع).

منه، وبالتالي لا يمكن أن نصفه بأنه يتكون من أية مادة أخرى.

كانت تلك هي الإجابة الأولى. وتعتمد الإجابة الثانية على الحقيقة البسيطة في أننا حتى الآن لا نعرف بعد إن كانت نظرية الأوتار صحيحة وأنها النظرية النهائية للطبيعة. فإذا كانت نظرية الأوتار غير صحيحة، فعندئذٍ يمكن أن نتناسى الأوتار ولا نتحدث عنها ولا نطرح الأسئلة غير الملائمة عن تركيبها. ومع أن هناك احتمالاً لذلك، إلا أن الأبحاث العلمية منذ منتصف الثمانينيات من القرن العشرين تشير بشكلٍ طاغٍ إلى أن ذلك غير محتمل إطلاقاً. ومن المؤكد أن التاريخ قد علّمنا أنه في كل مرة يتعمق فهمنا عن الكون فإننا نجد أنه ما زال هناك مكونات مجهرية أدق تشكل مستوى أكثر دقة ضمن المادة. وهناك احتمال آخر، إذا فشلت الأوتار في أن تصبح النظرية النهائية، وهو احتمال أن تكون الأوتار واحدة أخرى من الطبقات في البصلة الكونية، وهي الطبقة التي تصبح مرئية عند طول بلانك، وليست الطبقة النهائية. وفي هذه الحالة، فإن الأوتار قد تتكون من بنى أصغر منها. أثار منظرو نظرية الأوتار هذا الاحتمال واستمروا في تعقبه. وهناك تلميحات متشابكة حتى هذه اللحظة في الدراسات النظرية حول أن يكون للأوتار بنية أصغر. لكن حتى الآن لا توجد أدلة محددة بعد. فالزمن والبحث الدؤوب هما فقط الكفيلان بالرد على هذا السؤال.

وفي ما عدا بعض الافتراضات في الفصلين 12، و15، ومن مناقشاتنا سنتعرض للأوتار من وجهة نظر الإجابة الأولى - أي أننا سنعتبر الأوتار هي المكونات الأكثر أساسية في الطبيعة.

ثالثاً: التوحد من خلال نظرية الأوتار

وبجانب عدم مقدرة النموذج القياسي على احتواء قوى الجاذبية، فإن له عيباً آخر: لا يوجد تفسير لتفاصيل التركيب. فلماذا انتقت الطبيعة قائمة الجسيمات المحددة والقوى الموضحة في الفصول السابقة والواردة في الجدولين رقمي (1-1) و(1-2)؟ ولماذا هذه القيم بالذات للمؤشرات التسعة عشر التي تصف هذه المكونات كمياً؟ لا يمكن مقاومة الإحساس بأن هذه الأرقام والخواص التفصيلية مجرد اختيار فقط.وهل هناك فهم أعمق يكمن وراء هذه المكونات العشوائية ظاهرياً، أم أن الخواص الفيزيائية التفصيلية للعالم قد "اختيرت" بالصدفة؟

ولا يقدم النموذج القياسي نفسه تفسيراً، حيث أنه يأخذ قائمة الجسيمات وخواصها كمدخلات تجريبية. وكما يحدث تماماً في البورصة فإن قيمة ما تملكه لا يمكن تحديده من دون إدخال بيانات استثماراتك الأصلية، فإن النموذج

القياسي لا يستطيع إجراء أي تنبؤات من دون إدخال البيانات عن الخواص الأساسية للجسيمات[6]. وبعد أن يقوم الفيزيائيون التجريبيون بقياس هذه البيانات بدقة عالية يمكن للنظريين أن يستخدموا النموذج القياسي لإجراء تنبؤات يمكن اختبارها، مثل ما يمكن أن يحدث عندما تندفع جسيمات معينة لتتجمع داخل مسرّع. لكن النموذج القياسي لا يستطيع أن يفسر خواص الجسيمات الأولية في الجدولين رقمي (1-1) و(1-2) أكثر مما يستطيع مؤشر داو جونس[*] أن يفسر استثماراتك الأصلية في الأسهم منذ عشر سنوات.

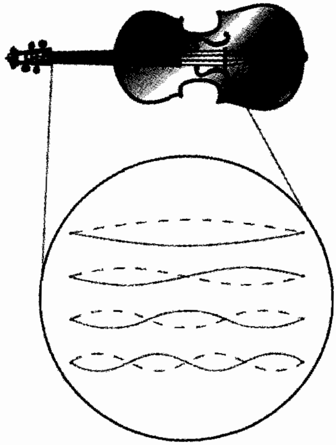
ولو اكتشفت التجارب محتوى من الجسيمات المختلفة بعض الشيء في العالم المجهري، من المحتمل أن تتداخل مع قوى أخرى مختلفة بعض الشيء، فإن هذه التغيرات يمكن تضمينها بسهولة معقولة في النموذج القياسي وذلك بتزويد النظرية بمدخَلات مختلفة. ومن هذا المنطلق فإن بنية النموذج القياسي مرنة جداً لدرجة أنها يمكن أن تفسر خواص الجسيمات الأولية، كما أنها يمكن أن تتضمن مدى من الاحتمالات.

لكن نظرية الأوتار مختلفة اختلافاً جذرياً. فهي صرح نظري فريد وغير مرن. وهي لا تتطلب أي مُدخلات عدا رقم واحد مشروع في ما بعد، يمثلَ علامة مميزة للمقاييس. فكل خواص العالم الميكروي تقع داخل مجال مقدرتها على التفسير. وحتى نفهم ذلك لنأخذ أوتاراً مألوفة أكثر لنا مثل أوتار الكمان. لكل وتر من هذه الأوتار عدد هائل من الأنساق الاهتزازية المختلفة (في الواقع عدد لانهائي) تسمى الرنين (Resonance) كما هو موضح في الشكل رقم (6-1). وهذه هي أنساق الموجات بقممها ومنخفضاتها تفصل بينها مسافات متساوية وتناسب تماماً المسافة بين نقطتي تثبيت الوتر. وتشعر آذاننا برنين الأنساق الاهتزازية المختلفة كنغمات موسيقية متباينة. وللأوتار في نظرية الأوتار صفات مماثلة. وهناك رنين لنسق اهتزازي يحدثه الوتر نتيجة المسافات المتساوية بين القمم والمنخفضات التي تناسب تماماً بعده المكاني. ويعطي الشكل رقم (6-2) بعض

(6) يقترح النموذج القياسي آلية تكتسب بها الجسيمات كتلتها - آلية هيغس Higgs، وذلك على اسم الفيزيائي الأسكتلندي بيتر هيغس. غير أنه من وجهة نظر تفسير كتلة الجسيمات فإن ذلك مجرد إزاحة لحمل تفسير خواص الجسيمات المفترضة "التي تعطي الكتلة" - أي تلك المسماة "بوزون هيغس" (Higgs Boson). وتجري الآن الأبحاث التجريبية لاكتشاف هذه الجسيمة، لكنه حتى لو اكتشفت وتم تحديد خواصها، فإن ذلك سيشكل بيانات مُدخلات للنموذج القياسي، الذي لا تقدم له النظرية تفسيراً.

(*) مؤشر لمجموعة من الشركات الأمريكية الكبرى ويستخدم في بورصة نيويورك (وول ستريت) - (المترجم والمراجع).

الشكل رقم (6-1)

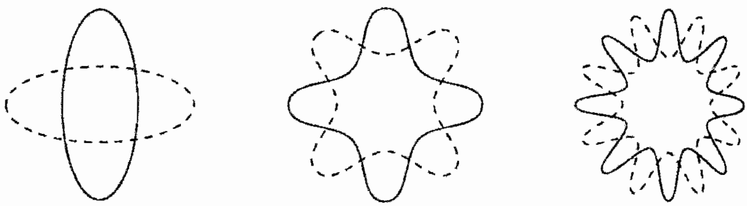


يمكن لأوتار الكمان أن تتذبذب على شكل أنساق رنينية حيث تناسب أعداد صحيحة من القمم والمنخفضات بالضبط المسافة بين نهايتي الوتر.

الأمثلة. وهنا الحقيقة المحورية: تماماً كما في حالة الأنساق الاهتزازية المختلفة لأوتار الكمان التي تعطي نغمات موسيقية مختلفة، فإن "الأنساق الاهتزازية المختلفة لوتر أساسي تعطي كتلاً وشحنات قوى مختلفة". ولأن هذه النقطة هامة جداً، فسنذكرها مرة أخرى. وطبقاً لنظرية الأوتار، فإن خواص الجسيمة الأولية - كتلة وشحنة قواها المتنوعة - تتحدد بنسق الرنين الدقيق للاهتزازات التي يحدثها وترها الذاتي.

ومن أسهل ما يمكن فهم الارتباط بين ذلك وكتلة الجسيمة. وتعتمد طاقة نسق اهتزاز وتر معين على سعته - الإزاحة القصوى بين القمم والمنخفضات - وطول موجته - المسافة الفاصلة بين قمتين متتاليتين. وكلما زادت السعة وقصر طول الموجة زادت الطاقة. ويعكس ذلك ما قد تتوقعه بحدسك - فكلما كان النسق الاهتزازي أكثر هيجاناً زادت الطاقة، وكلما قل الهيجان نقصت الطاقة. وهناك مثالان في الشكل رقم (6-4). وهو أمر مألوف، مرة أخرى، فكلما ضربت أوتار الكمان بعنف أكثر فإنها تتذبذب بسعة أكبر، أما الأوتار التي تضرب برقة أكثر فإنها ستتذبذب بهدوء أكثر (سعة أقل). ونحن نعرف الآن من النسبية الخاصة أن الطاقة والكتلة وجهان لنفس العملة: فزيادة الطاقة تعني زيادة الكتلة والعكس صحيح. وهكذا وطبقاً لنظرية الأوتار فإن كتلة الجسيمة الأولية تتحدد بطاقة النسق الاهتزازي لوترها الداخلي. فأوتار الجسيمات الأثقل تتذبذب بصورة أكثر نشاطاً

الشكل رقم (6-2)



يمكن للحلقات في نظرية الأوتار أن تتذبذب في أنساق رنينية - تماثل ما يحدث لأوتار الكمان - حيث يتناسب عدد صحيح من القمم والمنخفضات بالضبط مع المسافة التي يشغلها الوتر.

بينما تتذبذب الأوتار الداخلية للجسيمات الأخف بصورة أقل نشاطاً.

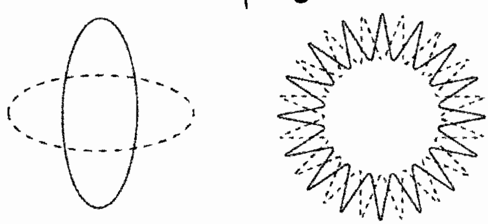
وحيث أن كتلة الجسيمة تحدد خواص جاذبيتها، فإننا نرى أن هناك علاقة مباشرة بين نسق اهتزاز الوتر وتجاوب الجسيمة تجاه قوى الجاذبية. وعلى الرغم من أن هذا التعليل تجريدي بعض الشيء، إلا أن الفيزيائيين قد وجدوا تطابقاً بين تفاصيل بعض السمات الأخرى للنسق الاهتزازي للوتر وخواصه.ويحدث نفس الشئ بالنسبة للقوى الأخرى، فتتحدد الشحنة الكهربية والشحنة الضعيفة والشحنة القوية التي يحملها وتر معين، مثلاً، بالطريقة الدقيقة التي يهتز بها هذا الوتر. والأكثر من ذلك، فإن نفس الفكرة بالضبط تنطبق على الجسيمات المراسلة نفسها. فالجسيمات مثل الفوتونات والبوزونات القياسية الضعيفة والغليونات ما هي إلا أنساق رنينية لاهتزازات الأوتار. ومن الأمور ذات الأهمية الخاصة، اتضح أنه من بين أنساق اهتزازات الأوتار هناك نسق معين يتطابق تماماً مع خواص الغرافيتون، مما يؤكد أن الجاذبية هي جزء متكامل في نظرية الأوتار(7).

وهكذا فإننا نرى طبقاً لنظرية الأوتار أن الخواص المشاهدة لكل جسيمة أولية تنتج من كون وترها الداخلي يحدث نسق اهتزاز رنيني معيناً، ويختلف هذا

(7) بالنسبة للقراء ذوي الميول الرياضية، فإننا نذكر أن الترافق بين الأنساق الاهتزازية للأوتار وشحنات القوى يمكن أن يوصف بدقة أكثر في ما يلي. عند كنتمة حركة الوتر، فإن حالات الاهتزاز الممكنة تمثل بمتجهات في فضاء هيلبرت تماماً كما في حالة أي نظام في ميكانيكا الكم. ويمكن ترقيم هذه المتجهات بواسطة قيم دايجين تحت مجموعة من عوامل هيرميتيان المتنقلة. ويقع معامل هاميلتونيان ضمن هذه المعاملات حيث تعطي قيمته الطاقة وبالتالي كتلة الحالة الاهتزازية وكذلك المعاملات التي تولد التناظرات القياسية المتنوعة والتي تخضع لها النظرية. وتعطي قيم إيجين للمعاملات الأخيرة شحنات القوى التي تحملها حالات اهتزاز الأوتار المرافقة.

المنظور بشدة عن ذلك الذي اعتقد به الفيزيائيون قبل اكتشاف نظرية الأوتار. ففي المنظور الأقدم كانت الاختلافات بين الجسيمات الأولية تفسر بالقول أنه في الواقع قد "صُنع كل نوع من الجسيمات من نسيج مختلف". فمع أن كل جسيمة كانت تعتبر أولية، فإن نوع "حشو" كل منها كان يعتقد أنه مختلف. فمثلاً "حشو" الإلكترون له شحنة سالبة، بينما "حشو" النيوترينو ليس له شحنة كهربية. وتغير نظرية الأوتار هذه الصورة راديكالياً بأن تزعم أن "حشو" كل المواد وكل القوى هو "نفس الحشو". فتتكون كل جسيمة أولية من وتر منفرد - أي أن كل جسيمة هي وتر منفرد - وكل الأوتار واحدة تماماً. وينتج الاختلاف بين هذه الجسيمات من كون وتر كل منها يحدث نسق اهتزاز رنيني مختلفاً. وما يبدو أنه جسيمات أولية مختلفة هو في الواقع "نغمات" مختلفة لوتر أساسي واحد. وحيث أن العالم يتكون من عدد هائل من هذه الأوتار المتذبذبة، فإنه بذلك يمثل سيمفونية كونية.

الشكل رقم (6-3)



للأنساق الاهتزازية الأكثر هياجاً طاقة أكبر من تلك الأقل هياجاً.

وتوضح هذه النظرية العامة كيف أن نظرية الأوتار تقدم إطاراً موحداً حقيقياً رائعاً. فكل جسيمة مادية وكل ناقل للقوى يتكون من وتر له نسق اهتزاز مميز يعتبر بمثابة "بصمته". ولأن كل حدث فيزيائي وكل عملية وكل ما هو موجود في العالم يمكن أن يوصف - في أعمق مستوياته الأولية - بمدلول القوى التي تعمل في ما بين هذه المكونات الأولية للمادة، فإن نظرية الأوتار تقدم الأمل أن تكون هي الوصف الموحد الشامل للعالم الفيزيائي: أي نظرية كل شيء (T.O.E.).

رابعاً: موسيقى نظرية الأوتار

على الرغم من أن نظرية الأوتار قد أزاحت المفهوم السابق عن الجسيمات الأولية التي لا بنية لها، إلاً أن اللغة القديمة عنيدة، وبالذات لأنها تقدم وصفاً

دقيقاً للواقع في المستويات الدقيقة جداً للمسافات. ولأننا سنتبع ما هو معمول به في هذا المجال، فسنستمر في الإشارة إلى "الجسيمات الأولية"، إلا أننا نعني بذلك "ما يبدو أنه جسيمات أولية، لكنها في الواقع قطع دقيقة من أوتار متذبذبة". وقد اقترحنا في الفقرات السابقة أن الكتلة وشحنة القوى لمثل هذه الجسيمات الأولية ما هي إلاّ نتاج الطريقة التي تتذبذب بها أوتارها. ويقودنا ذلك إلى الحقيقة الآتية: إذا استطعنا حساب نسق الاهتزاز الرنيني للأوتار الأساسية بدقة - "النغمة"، التي تلعبها هذه الأوتار - فإننا لا بد من أن نتمكن من تفسير الخواص التي نشاهدها للجسيمات الأولية. وبذا، فإنه لأول مرة تضع نظرية الأوتار إطاراً "لتفسير" خواص الجسيمات التي نلاحظها في الطبيعة.

وعند هذه المرحلة، فإننا يجب أن نُمْسِكَ بالوتر ونضرب عليه بكل الطرق الممكنة لتحديد الأنساق الاهتزازية الرنينية المحتملة. فإذا كانت نظرية الأوتار صحيحة، فإننا سنجد أن الأنساق المحتملة ستعطي خواص المادة وجسيمات القوى في الجدولين رقمي (1-1) و(1-2) بدقة. وطبيعي أن الوتر من الصغر بحيث لا يمكن إجراء تجربتنا هذه حرفياً كما هي مكتوبة. لكن باستخدام الوصف الرياضي فإننا يمكن أن نضرب، نظرياً، على الأوتار. وفي منتصف الثمانينيات من القرن العشرين اعتقد الكثيرون من المتحمسين لنظرية الأوتار أن التحليل الرياضي المطلوب لإجراء هذه العملية كان على وشك التوصل إلى تفسير لكل تفاصيل خواص الكون في أدق مستوياته المجهرية. وقد أعلن بعض المتحمسين من الفيزيائيين أن نظرية كل شيء (T.O.E.) قد تم اكتشافها أخيراً. وقد اتضح من الإدراك اللاحق على مدى أكثر من عقد من السنوات أن بهجة الانتصار الناتجة من هذا الاعتقاد كانت سابقة لأوانها. تضمنت نظرية الأوتار عناصر لنظرية كل شيء (T.O.E.)، لكن ظل هناك عدد من الحواجز يمنعنا من استنتاج طيف اهتزازات الأوتار بالدقة المطلوبة للمقارنة بالنتائج التجريبية. وحتى هذه اللحظة فإننا لا نعلم ما إذا كنا نستطيع تفسير الخواص الأساسية لعالمنا المذكورة في الجدولين رقمي (1-1) و(1-2) بواسطة نظرية الأوتار. وكما سنناقش في الفصل التاسع، وباستخدام فروض معينة سنعرضها بوضوح، فإن نظرية الأوتار يمكن أن تعطي خواص العالم في توافق كيفي مع البيانات المعروفة للجسيمات والقوى، لكن استنتاج التفاصيل الرقمية من هذه النظرية ليس في مقدورنا في الوقت الحاضر. وهكذا، وبالرغم من أن إطار نظرية الأوتار قادر على تفسير السبب في أن الجسيمات والقوى لها الخواص التي هي عليها، على عكس النموذج القياسي

للجسيمة النقطة، إلا أننا لا نقدر حتى الآن أن نستنتج هذه الخواص. لكن من الجدير بالذكر أن نظرية الأوتار غنية بشكل واضح وبعيدة المدى، وبالرغم من أننا وإن كنا لا نستطيع حتى الآن تحديد معظم خواصها التفصيلية، إلا أننا يمكن أن نكتسب بصيرة في الآفاق الغنية للظواهر الفيزيائية الجديدة التي نتجت من النظرية، كما سنرى في الفصول التالية.

وسنناقش في الفصول التالية كذلك حالة المعوقات التي تواجه النظرية بشيء من التفصيل، لكن من المفيد أولاً أن نفهمها بشكل عام. وتتواجد الأوتار في العالم المحيط بنا بتوترات متنوعة. فالوتر "الرباط" الذي ندخله في ثقوب الحذاء مثلاً، يكون عادة فضفاضاً (غير مشدود) عند مقارنته بالأوتار المشدودة في الكمان بين نقطتين. لكن هذين الاثنين بدورهما أقل توتراً بكثير من الأوتار المصنوعة من الصلب في البيانو. والعدد الذي تتطلبه نظرية الأوتار لتضع المقياس الشامل هو التوتر الذي يقابل حلقات الوتر. كيف يتحدد هذا التوتر؟ حسناً، إذا تمكنّا من ضرب وتر أساسي فإننا سنعرف مدى صلابته، وبذلك نستطيع قياس توتره تماماً بنفس كيفية قياس توتر الأوتار الأكثر ألفة في حياتنا اليومية. لكن لأن الأوتار الأساسية في غاية الدقة، فإن هذه الطريقة لا يمكن استخدامها، ويتطلب الأمر طريقة غير مباشرة. في العام 1974، عندما اقترح كل من تشيرك وشوارتز أن جسيمة الغرافيتون هي نسق معين من أنساق اهتزازات الأوتار، فإنهما استطاعا استثمار مثل هذا المنطلق غير المباشر للتنبؤ بتوتر الأوتار في النظرية. وقد كشفت حساباتهما أن شدة القوة المنقولة بنسق الغرافيتون لاهتزاز الوتر المقترح تتناسب عكسياً مع توتر الوتر. وحيث أنه من المفترض أن ينقل الغرافيتون قوى الجاذبية - القوى الضعيفة الواهنة ذاتياً - فقد وجدا أن ذلك يعني توتراً هائلاً يصل إلى ألف مليار مليار مليار (10^{39}) طن، وهو المعروف باسم توتر بلانك. ولذا فإن الأوتار الأساسية في غاية الصلابة عند مقارنتها بالأوتار الأكثر ألفة، الأمر الذي يؤدي إلى ثلاثة نتائج متعاقبة.

خامساً: النتائج الثلاث المتعاقبة للأوتار المشدودة

أولاً، بينما تكون نهايتا الوتر في البيانو والكمان مثبتتين لتحديد طول ثابت له، فإنه لا يوجد شيء مشابه ليثبت طول الوتر الأساسي. وفي المقابل فإن التوتر الهائل للوتر يتسبب في تقلص الحلقات في نظرية الأوتار إلى أحجام متناهية الضآلة. وتؤدي الحسابات التفصيلية إلى أنه في حالة وجود توتر بلانك، فإن ذلك

يعني أن يصبح طول الوتر النمطي مساوياً لطول بلانك - 10^{33} سنتيمتر - كما ذكرنا من قبل[8].

ثانياً، ونظرا للتوتر الرهيب فإن الطاقة النمطية لحلقة تتذبذب في نظرية الأوتار تكون عالية بدرجة قصوى. وحتى نفهم ذلك فإننا نعرف أنه كلما زاد توتر الوتر أصبح دفعه للاهتزاز أصعب. فمثلاً، أسهل كثيراً أن تضرب وتراً في الكمان وجعله يهتز، من أن تفعل ذلك مع وتر البيانو. فإذا كان لوترين توتر مختلف، وكانا يتذبذبان بنفس الطريقة تماماً، فلن يكون لهما نفس الطاقة. فالوتر ذو التوتر الأعلى ستكون طاقته أعلى من الوتر ذي التوتر الأقل، لأنه يتطلب طاقة أكثر لدفعه للاهتزاز.

وينبهنا ذلك إلى حقيقة أن طاقة الوتر المتذبذب تتحدد بشيئين: الطريقة الدقيقة التي يتذبذب بها (الأنساق الأكثر هياجاً تقابل طاقات أعلى) وتوتر الوتر (التوتر الأعلى يقابل طاقة أعلى). وفي البداية قد يجعلك هذا الوصف تفكر بأنه إذا تناولنا أنساق اهتزاز أهدأ فأهدأ - أنساقاً لها سعات أصغر فأصغر وعدد أقل من القمم والانخفاضات - فإن الوتر يمكن أن يحتوي على طاقة أقل فأقل. ولكن، كما وجدنا في الفصل الرابع، وفي صياغة مختلفة،فإن ميكانيكا الكم تنبئنا بأن هذا المنطق غير صحيح. فمثل كل الاهتزازات أو الاضطرابات الموجية، تنص ميكانيكا الكم على أن تلك الاهتزازات والاضطرابات لا توجد إلا في وحدات منفصلة. ويمكن عموماً القول بأنه تماماً مثل قطع العملة التي تم تكليف بعض الأفراد بها، فإن الطاقة المتضمنة في نسق اهتزاز الوتر تكون أيضاً مضاعفات صحيحة لفئات من قيم دنيا من الطاقة. وبالتحديد فإن فئات القيم الدنيا للطاقة هذه تتناسب مع توتر الوتر (كذلك تتناسب مع عدد القمم والانخفاضات في النسق الاهتزازي المعين)، بينما يتحدد العدد الصحيح للمضاعفات بسعة نسق الاهتزاز.

---

(8) وانطلاقاً من الأفكار التي ظهرت عن الثورة الثانية للأوتار الفائقة (التي سنعرض لها في الفصل 12) حدد ويتن، وكذلك جو لايكين بصفة خاصة من مختبر فيرمي المعجل القومي، خطأً ذا قيمة لكنه ممكن الحدوث في هذا الاستنتاج. وقد اقترح لايكين مستغلاً هذا المنهج أنه من المحتمل أن تكون هذه الأوتار تحت تأثير توتر أقل بكثير، وبالتالي تكون أطول كثيراً من المتوقع في الأصل. ويمكن أن تكون هذه الأوتار من الكبر بحيث يمكن رصدها بواسطة الجيل القادم من معجلات الجسيمات. فإذا كان هذا الاحتمال بعيد المنال ونادراً، فإن الأمر المثير والمتوقع هو أن التضمينات الهامة لنظرية الأوتار التي نوقشت في هذا الفصل وفي الفصول التالية يمكن التحقق منها تجريبياً خلال العقد القادم. ولكن حتى في أكبر السيناريوهات "المتفق عليها" والتي يتبناها منظرو نظرية الأوتار، والتي يقع طول الأوتار فيها في حدود 10^{-33} سم عادة، فإن هناك وسائل غير مباشرة للتعرف عليها تجريبياً كما سنشرح ذلك في الفصل التاسع.

والنقطة المحورية في هذا النقاش هي: حيث أن الفئات الدنيا للطاقة تتناسب مع توتر الوتر، وحيث أن هذا التوتر هائل، فإن الطاقات الدنيا الأساسية هي بالمثل هائلة جداً، وذلك بالمقاييس العادية لفيزياء الجسيمات الأولية. وهي مضاعفات لما هو معروف بطاقة بلانك. ولندرك هذا المقياس، فإننا إذا حولنا طاقة بلانك إلى كتلة مستخدمين معادلة آينشتاين الشهيرة ، فإن هذه الطاقات ستقابل كتلاً في حدود عشرة مليارات مليارات المرات أكبر من كتلة البروتون (مرة). وتسمى هذه الكتلة الهائلة - بمعايير الجسيمات الأولية - "بكتلة بلانك"، وهي تساوي تقريباً كتلة حبة من الغبار أو تجمع لما يقرب من مليون بكتيريا. وهكذا يصبح المكافئ الكتلي النمطي لحلقة متذبذبة في نظرية الأوتار عموماً أعداداً صحيحة لمضاعفات كتلة بلانك (1، 2، 3، ...). وغالباً ما يعبر الفيزيائيون عن ذلك بقولهم مقياس الطاقة "الطبيعي" أو "النمطي" (وبالتالي مقياس الكتلة) في نظرية الأوتار وهو مقياس بلانك.

ويثير ذلك سؤالاً محورياً يتعلق مباشرة بالهدف من إعادة الحصول على نفس خواص الجسيمات المذكورة في الجدولين رقمي (1-1) و(1-2): فإذا كان المقياس "الطبيعي" للطاقة في نظرية الأوتار هو حوالى عشرة مليارات مرة أكبر من البروتون، فكيف يمكن أن تحسب الجسيمات الأخف كثيراً مثل الإلكترون والكواركات والفوتونات وغيرها، التي يتكون منها العالم حولنا؟

ويأتي الجواب مرة ثانية من ميكانيكا الكم. فيؤكد مبدأ عدم التيقن أنه لا شيء في حالة سكون تام. فكل الأجسام تعاني من الهياج الكمي، لأنها إذا لم تفعل ذلك فسنعرف أين هي وما هي السرعة التي تتحرك بها بدقة كاملة، الأمر الذي يتعارض مع مقولة هيزنبرغ المأثورة. وينطبق ذلك أيضاً على الحلقات في نظرية الأوتار، مهما بدا ظاهرياً أن الوتر هادئ، إلا أنه يقوم بشيء من الاهتزازات الكمية. والشيء الجدير بالملاحظة، كما ظهر في السبعينيات من القرن العشرين، هو أنه من الممكن أن يحدث "تلاشٍ" للطاقة بين هذه الهياجات الكمية ونوع اهتزازات الوتر الأكثر حدسية والذي ناقشناه سابقاً وهو موضح في الشكلين رقمي (6-2) و(6-3). وبالفعل، ومن خلال غرابة ميكانيكا الكم فإن الطاقة المصاحبة للهياج الكمي للوتر تكون "سالبة"، و"يقلل" هذا من محتوى الطاقة الكلي للوتر المتذبذب بمقدار مساوٍ تقريباً لطاقة بلانك. ويعني ذلك أن الطاقة الأدنى لأنساق اهتزازات الأوتار، التي يمكن أن نتوقع ببساطة أنها مساوية تقريباً لطاقة بلانك (أي مرة واحدة مثل طاقة بلانك) على الأرجح تتلاشى مؤدية بذلك إلى طاقات اهتزاز محصلتها منخفضة، وهي الطاقات التي لها مكافئات قريبة من كتل المادة

وجسيمات الطاقة الموضحة في الجدولين رقمي (1-1) و(1-2). إنها هذه الطاقات الضئيلة لأنساق الاهتزازات التي لذلك تمثل حلقة الوصل بين الوصف النظري للأوتار والعالم التجريبي المتاح لفيزياء الجسيمات. وكمثال هام، فقد وجد تشيرك وشوارتز أنه بالنسبة للنسق الاهتزازي ذي الخواص التي ترشحه ليكون جسيمة غرافيتون المرسال، فإن الطاقة تتلاشى تماماً مؤدية إلى جسيمة قوى جاذبية كتلتها صفر. وهو المتوقع تماماً من الغرافيتون، حيث قوى الجاذبية تنتقل بسرعة الضوء ولا ينتقل بهذه السرعة القصوى سوى الجسيمات عديمة الكتلة. لكن الجسيمات منخفضة الطاقة الاهتزازية هي الاستثناء وليست القاعدة. والوتر الأساسي المتذبذب الأكثر نمطية عبارة عن جسيمة كتلتها أكبر مليارات المرات من كتلة البروتون.

ويدلنا ذلك على أن الجسيمات الأساسية الخفيفة نسبياً الموجودة في الجدولين رقمي (1-1) و(1-2) لا بد أن تنشأ، بشكل ما، من الضباب الرقيق الذي يحوم فوق المحيط الهائج للأوتار ذات الطاقة العالية. ويمكن لجسيمة في ثقل الكوارك القمة الذي كتلته تساوي 189 مرة تقريباً كتلة البروتون أن تنشأ من وتر يتذبذب فقط إذا تلاشت الطاقة الهائلة الخاصة بالوتر بمقياس بلانك بواسطة هياجات عدم التيقن الكمي بدقة أكثر من جزء من المائة من الجزء من المليون من جزء من المليار. ويبدو الأمر كأنه برنامج "السعر المناسب" (The Price Is Right)(*) حيث يعطيك بوب باركر - مقدم البرنامج - عشرة مليارات المليارات من الدولارات، ويتحداك أن تشتري منتجات تساوي كل المبلغ ما عدا 189 دولاراً بلا زيادة أو نقص. ولكي تصل لمثل هذه الدقة الهائلة من دون أن تكون على دراية دفينة بالأسعار الدقيقة للأغراض موضع التقويم، فإن ذلك سيربك بشدة حتى أعظم المتسوقين خبرة في العالم. وفي نظرية الأوتار حيث الطاقة هي العملة البديلة، فإن الحسابات التقريبية قد بينت بما لا يدع مجالاً للشك أن التلاشي المشابه للطاقة "يمكن أن يحدث بكل تأكيد؛ لكن ولأسباب ستبدو أكثر وضوحاً في الفصول التالية، فإن التحقق من هذا التلاشي بهذه الدرجة العالية من الدقة يقع عموماً خارج نطاق إدراكنا النظري. وبالرغم من ذلك، وكما أشرنا من قبل، فإننا سنرى أن الكثير من الخواص الأخرى لنظرية الأوتار، التي هي أقل حساسية لمثل تلك التفاصيل الدقيقة، يمكن استنتاجها وإدراكها بكل ثقة.

ويأخذنا ذلك إلى النتيجة المتعاقبة الثالثة للقيمة الهائلة لتوتر الأوتار. تستطيع

(*) برنامج مسابقات في التلفيزيون الأمريكي يقوم فيه المتسابقون البضائع بدرجة دقيقة معينة ليكسبوا، ويتوقف مكسبهم على درجة دقة تقويمهم للأسعار (المترجم والمراجع).

الأوتار أن تقوم بعدد لا نهائي من أنساق الاهتزازات المختلفة. فمثلاً في الشكل رقم (6-2)، بيّنا البدايات لاحتمالات متتابعة لا تنتهي تتميز بأعداد متزايدة من القمم والانخفاضات. ألا يعني ذلك أنه في المقابل لا بد من أن توجد تتابعات من الجسيمات الأولية لا تنتهي تبدو وكأنها تتناقض مع الموقف التجريبي المعروض في الجدولين رقمي (1-1) و(1-2)؟

والجواب نعم: فإذا كانت نظرية الأوتار صحيحة، فإن كل نسق من الأنساق الرنينية للأوتار المتذبذبة لا بد أن تقابله جسيمة أولية. غير أن النقطة الأساسية هي أن التوتر المرتفع للوتر يؤكد أن كل أنساق الاهتزازات - ما عدا القليل - سيقابلها جسيمات ثقيلة بدرجة قصوى (والقليل هنا هو الاهتزازات الأقل طاقة، والتي عانت من تلاشٍ للطاقة شبه تام مع الهياج الكمي للأوتار). ومرة أخرى، فإن تعبير "ثقيل" هنا يعني أثقل مرات كثيرة من كتلة بلانك. وحيث أن أعظم مسرِّعات الجسيمات قدرة يمكن أن تصل بالطاقة إلى ما يقرب من ألف ضعف كتلة البروتون فقط، أي أقل من جزء من المليون من جزء من المليار من طاقة بلانك، فإننا بعيدون جداً عن أن نجري أبحاثاً مخبرية على أي من هذه الجسيمات الجديدة التي تنبأت بها نظرية الأوتار.

لكن هناك طرق غير مباشرة يمكن استخدامها في دراسة تلك الجسيمات. فمثلاً الطاقة المتضمنة أثناء مولد الكون لا بد من أنها كانت من الكبر بحيث تتمكن من إنتاج هذه الجسيمات بوفرة. وعموماً لا يتوقع أحد أن تظل هذه الجسيمات حتى يومنا هذا، لأن مثل تلك الجسيمات الفائقة الثقل عادة ما تكون غير ثابتة، فتتخلص من كتلتها الهائلة بتفككها إلى سلسلة من الجسيمات الأخف نسبياً، لتنتهي إلى الجسيمات الخفيفة نسبياً التي تملأ العالم حولنا. ومع ذلك، من الممكن أن مثل هذه الحالة فائقة الثقل من الأوتار المتذبذبة - كتذكار من الانفجار الهائل - قد صمدت حتى وقتنا هذا. وسيصبح اكتشاف مثل هذه الجسيمات، كما سنشرح بتفصيل أكثر في الفصل التاسع، اكتشافاً تذكارياً هائلاً على أقل تقدير.

سادساً: الجاذبية وميكانيكا الكم في نظرية الأوتار

الإطار الموحد الذي تقدمه نظرية الأوتار طاغ. لكن أفضل ما فيها هو مقدرتها على تخفيف العداوة بين قوى الجاذبية وميكانيكا الكم. ولنتذكر أن مشكلة مزج النسبية العامة وميكانيكا الكم قد ظهرت لأن العقيدة المحورية في النسبية العامة هي كون الزمان والمكان يشكلان بنية هندسية ناعمة التحدب، وذلك في مواجهة السمات الأساسية لميكانيكا الكم في أن كل شيء في الكون، بما في

ذلك نسيج الزمان والمكان، يعاني من التأرجحات الكمية التي تزداد اضطراباً كلما اختبرناها على مستويات أصغر فأصغر في المسافات. ففي المسافات الأقل من مقياس بلانك، تصبح التموجات الكمية من العنف لدرجة أنها تحطم مفهوم المكان الهندسي ناعم التحدب، الأمر الذي يعني سقوط النسبية العامة.

قامت نظرية الكم بتهدئة التموجات الكمية وذلك "بطمس" خواص الفضاء في المسافات القصيرة. وهناك إجابة تقريبية وأخرى أكثر دقة للرد على السؤال عما يعنيه ذلك وعن كيفية حل هذا التناقض. وسنشرح ذلك تباعاً.

1- الإجابة التقريبية

برغم أن الأمر قد يبدو ساذجاً، لكن إحدى وسائل معرفة بنية الأشياء هي أن تقذفها بأشياء أخرى ثم تلاحظ بدقة ماذا يحدث لتلك الأشياء. فنحن نرى الأشياء، مثلاً، لأن عيوننا تجمع وعقولنا تحل شفرة المعلومة التي تحملها الفوتونات عندما ترتد عن سطح الأشياء التي نراها. وتبني معجلات الجسيمات على نفس المبدأ: فهي تقذف بأشياء صغيرة من المادة مثل الإلكترونات والبروتونات بعضها في اتجاه بعض أو في اتجاه أهداف أخرى، لتقوم وسائل التحليل الدقيقة بتحليل رذاذ الشظايا المتناثر لتعيين بنية الأجسام موضع الدراسة.

وكقاعدة عامة فإن حجم الجسيمة المجس التي نستخدمها تحدد الحد الأدنى للطول الذي يمكن تسجيله. ولكي ندرك ما تعنيه هذه العبارة الهامة لنتخيل أن سليم وجيم قد قررا أن يرفعا من ثقافتهما بأن يلتحقا بفصل لتعليم الرسم. ومع تقدم الفصل الدراسي أصبح جيم أكثر استثارة تجاه الحرفية المتنامية التي اكتسبها سليم كفنان، واقترح أن يتحداه في مسابقة غير عادية. ويتلخص تحدي جيم في الآتي: يأخذ كل منهما نواة لثمرة الخوخ ويثبتها في ملزمة (منجلة) ثم يقوم برسم زيتي دقيق لها. لكن الشرط غير العادي لهذا التحدي أنهما لا يملكان الحق في رؤية هذه النواة، وبدلاً من ذلك فمسموح لكل منهما أن يعرف حجم وشكل وصفات النواة الخاصة به فقط بإطلاق أشياء معينة (ليست فوتونات) عليها وملاحظة كيف تحيد هذه الأشياء كما هو موضح في الشكل رقم (6-4). لم يكن معلوماً لدى سليم أن جيم قد ملأ مكان الإطلاق الخاص بسليم بكرات صلبة نسبياً (كما في الشكل رقم (6-4)، (a)) لكنه ملأ المكان الخاص به بكرات بلاستيكية أصغر من 5 ملليمتر (كما في الشكل رقم (6-4)، (b)). بدأ كلاهما في إطلاق الكرات وبدأت المنافسة.

وبعد فترة من الزمان، كان أفضل ما توصل إليه سليم هو في الشكل رقم

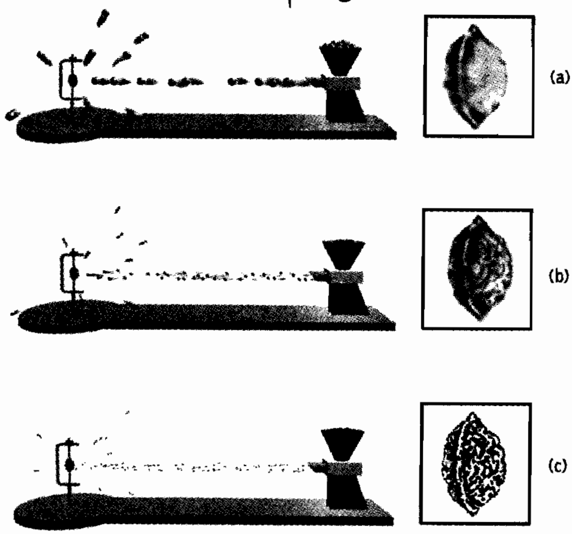
(6–4)، (a). فبملاحظة مسارات الكرات المرتدة تمكن من معرفة أن نواة الخوخ صغيرة وأنها كتلة ذات سطح صلب. كان ذلك هو كل ما استطاع أن يعرفه، فالكرات الكبيرة نسبياً التي استخدمها سليم أكبر من أن تشعر بالبنية المتعرجة الأدق لنواة الخوخ. وعندما ألقى سليم نظرة على رسم جيم (الشكل رقم (6–4)، (b)) اندهش لأنه أدرك أن جيم قد هزمه. وبنظرة خاطفة على مكان إطلاق جيم اكتشف الخدعة. فالقطع الصغيرة التي استخدمها جيم كمجسات كانت من الصغر بحيث تتأثر زاوية انحرافها ببعض السمات الكبيرة التي يتحلى بها سطح نواة الخوخ. وهكذا بإطلاق الكثير من الكرات ذات القطر 5 ملليمتر على نواة الخوخ ومتابعة ارتداد مسارها استطاع جيم أن يرسم صورة أكثر تفصيلاً. وحتى لا ينهزم سليم فإنه يعود مرة أخرى إلى منصة الإطلاق ويملأها بكرات قطرها حوالي نصف مليمتر، وهي من الصغر بحيث تستطيع أن تتداخل وترتد بواسطة أدق التعرجات على سطح النواة. وبمتابعة الكيفية التي ترتد بها هذه المُجسات الثاقبة فقد أصبح في مقدوره أن يرسم اللوحة الفائزة كما في الشكل رقم (6–4)، (c).

والدرس الذي استقيناه من هذه المنافسة البسيطة واضح: فالجسيمات التي تصلح كمجسات لا يمكن أن تكون أكبر كثيراً من السمة الفيزيائية التي تختبرها، وإلا فإنها لن تكون حساسة للبنية التي تستهدفها.

ويصدق نفس التعليل بالطبع في حالة ما إذا أردنا الحصول على مجسات لاختبار البنية الذرية وتحت الذرية بعمق أكثر. وفي هذه الحالة، فإن القذائف ذات القطر نصف ملليمتر لن تعطي أية معلومات مفيدة لأنها من الكبر بحيث لن تشعر بالبنى ذات المقاييس الذرية. ولهذا فإن معجلات الجسيمات تستخدم البروتونات والإلكترونات كمجسات، لأن أحجامها الصغيرة تجعلها أكثر ملاءمة لهذه المهمة. وبمقياس تحت ذري حيث تحل المفاهيم الكمية محل المنطق الكلاسيكي، فإن القياس المناسب لحساسية الجس عند الجسيمات هو طول الموجة الكمي، الذي يدل على هامش عدم التيقن في موقعها (نافذة عدم التيقن). وتعكس هذه الحقيقة مناقشاتنا لمبدأ عدم التيقن لهيزنبرغ في الفصل الرابع، الذي وجدنا فيه أن هامش الخطأ المتضمن عند استخدام جسيمة نقطة كمجس (ركزنا على مجسات الفوتونات، لكن المناقشة تصلح لجميع الجسيمات الأخرى) يساوي تقريباً طول موجة الكم للجسيمة المجس. وبلغة أبسط بعض الشيء، فإن حساسية المجس لجسيمة نقطة تنمحي باضطرابات ميكانيكا الكم بنفس الطريقة التي يتأثر بها مشرط الجراح عندما ترتعش يده أو يدها. ولنتذكر ما ورد في الفصل الرابع عن الحقيقة الهامة التي تنص على أن طول الموجة الكمي للجسيمة يتناسب عكسياً مع عزمها،

والذي هو مجازاً طاقتها. وهكذا بزيادة طاقة الجسيمة النقطة، فإن طول موجتها الكمية سيتناقص باستمرار - ويمكن أن يقل المحو الكمي أكثر فأكثر، وبالتالي يمكن استخدامها كمجس لفحص البنى الفيزيائية الأكثر دقة. ومن المعروف أن الجسيمات ذات الطاقة الأعلى لها قوة نفاذ أكبر، ولذا فهي قادرة على فحص السمات الأكثر دقة.

الشكل رقم (6-4)



نواة خوخ مثبتة في ملزمة (منجلة) وترسم فقط عن طريق ملاحظة كيف ترتد الأشياء - "المجسات" - المقذوفة عليها. وباستخدام مجسات تزداد صغرا - (a) كرات كبيرة، (b) كرات 5 ملليمتر، (c) كرات أصغر نصف ملليمتر - فإن تفاصيل أكثر ستظهر على اللوحة.

وفي هذا الصدد، فإن التمييز بين الجسيمات النقاط وجدائل الأوتار يصبح واضحاً. وتماماً كما في حالة استخدام الكرات البلاستيكية كمجسات لاختبار سمات سطح نواة الخوخ، فإن الأبعاد المكانية الخاصة بالأوتار تمنعها من فحص بنية أي شيء أصغر بجلاء من حجمها هي نفسها - وهي البنى التي لها مقاييس طولية أقل من طول بلانك. وبصورة أدق بعض الشيء، فإن دافيد غروس الذي كان في جامعة برينستون في ذلك الوقت، وتلميذه بول ميند قد بينا في العام 1988 أنه عندما نتعامل مع ميكانيكا الكم فإن الزيادة المستمرة في طاقة الوتر لا تعني زيادة مستمرة في مقدرته على فحص بِنىً أدق، وهو ما يتعارض مباشرةً مع ما

يحدث للجسيمة النقطة. وقد وجدا أنه عندما تزداد طاقة الوتر فإن مقدرته على فحص بنىً ذات أبعاد أقصر ممكنة في البداية، تماماً كما في حالة الجسيمة النقطة النشطة. لكن عندما تزيد طاقته وتتخطى القيمة المطلوبة لفحص بنى في حدود طول بلانك، فإن الطاقة المضافة لا تضيف حساسية للوتر الفاحص. وبدلاً من ذلك تسبب الطاقة المضافة نمو الوتر في الجسم، وبالتالي تقلل من حساسيته للمسافات القصيرة. ومع أن طول الوتر النمطي هو في الواقع طول بلانك، فإذا زودنا هذا الوتر بطاقة كافية - كمية من الطاقة تتعدى أقصى ما يمكن أن يدركه خيالنا الجامح، لكنها ربما تكون قد حدثت عند لحظة الانفجار الهائل - فإننا يمكن أن نجعله ينمو في الحجم إلى أن يصبح ماكروسكوبياً (أكبر من المجهري)، وبذا يصبح مجساً أخرق (غير ملائم) بالنسبة للعالم المجهري! وكما لو أن الوتر، على عكس الجسيمة النقطة، له مصدران للمحو: الاضطراب أو الهياج الكمي، كما هو الأمر للجسيمة النقطة، وأيضاً الحيز المكاني الخاص به. وتؤدي زيادة طاقة الوتر إلى نقص المحو من المصدر الأول (الاضطراب الكمي) لكنه في النهاية يزيد المحو من المصدر الثاني (الحيز المكاني). ولب الموضوع أنه مهما حاولت فإن الطبيعة الممتدة للوتر تمنعك من استخدامه لفحص الظواهر على المسافات الأقل من طول بلانك.

وكل التناقضات بين النسبية العامة وميكانيكا الكم تكمن في خواص النسيج الفضائي في المسافات الأقل من طول بلانك. "فإذا كان من غير الممكن اختبار المكونات الأولية للكون على مسافات أقل من طول بلانك، فلا هي ولا أي شيء يتكون منها يمكن أن يتأثر بالتموجات الكمية المدمرة المفترضة" . ويشبه ذلك ما يحدث عندما نمر بيدنا فوق سطح من الغرانيت أملس ثم صقله بشدة. فمع أنه على المستوى المجهري يتكون سطح الغرانيت من قطع منفصلة محببة، فإن أصابعنا غير قادرة على اكتشاف هذه الاختلافات القصيرة المدى فتشعر بالسطح أملس ناعماً. وتمحو أصابعنا الغليظة الفروق المجهرية بين القطع المكونة للسطح. وبالمثل، ولأن للوتر امتداداً مكانياً فإن له كذلك حدوداً لحساسيته للمسافات القصيرة. فهو لا يستطيع اكتشاف الاختلافات ذات الأبعاد الأقل من طول بلانك. ومثل أصابعنا فوق سطح الغرانيت، فإن الوتر يمحو التأرجحات فوق المجهرية المضطربة لمجال الجاذبية. وعلى الرغم من أن التأرجحات الناتجة ما زالت محسوسة إلا أن المحو يقلل من تأثيرها بما فيه الكفاية ليعالج عدم التوافق بين النسبية العامة وميكانيكا الكم. وبصفة خاصة فإن اللانهائيات الضارة (المعروضة في الفصل السابق) التي تظهر في حالة تطبيق مفهوم الجسيمة النقطة في صياغة نظرية

الكم للجاذبية، تم الاستغناء عنها بواسطة نظرية الأوتار.

والفرق الأساسي في التشبيه بين الغرانيت وموضوع اهتمامنا الحقيقي - النسيج الفضائي - هو أن هناك طرقاً يمكن بها الكشف عن التفاصيل المجهرية لسطح الغرانيت: يمكن استخدام مجسات أكثر دقة عن أصابعنا. فللمجهر الإلكتروني المقدرة على الكشف عن السمات السطحية لأقل من جزء من المليون من السنتيمتر، وهذا من الصغر بما يكفي للكشف عن العيوب العديدة على سطح الغرانيت. وعلى النقيض، فلا توجد طريقة في نظرية الأوتار للكشف عن "العيوب" في النسيج الفضائي على مستوى أقل من طول بلانك. وفي العالم الذي تحكمه قوانين نظرية الأوتار، فإن المفهوم المتفق عليه بأننا نستطيع دائماً أن نقسم (أو نقطع) الطبيعة إلى أبعاد أصغر فأصغر، من دون حدود، ليس صحيحاً. فهناك حدود، وتظهر هذه الحدود قبل أن نصل إلى الرغوة الكمية المدمرة في الشكل رقم (5-1). لذلك وبشكل سيصبح أكثر دقة في الفصول اللاحقة، فإنه يمكن حتى أن نقول إن التموجات الكمية العاصفة المفترضة على مستوى أقل من بلانك "لا توجد". والواثق يمكن أن يقول يوجد شيء ما إذا أمكن - ولو من ناحية المبدأ - جسه وقياسه. وحيث أنه من المفترض أن الوتر هو أكثر الأشياء أولية في الكون، ولأنه من الكبر بحيث لا يتأثر بالتموجات العنيفة في المستويات الأقل من بلانك في النسيج الفضائي ، فإن تلك التأرجحات لا يمكن قياسها، وبالتالي وطبقاً لنظرية الأوتار، فهي في الواقع لا توجد.

2- هل هي خفة يد؟

قد تجعلك هذه المناقشة غير راضٍ عنها. فبدلاً من أن تقوم نظرية الأوتار بترويض التموجات الكمية في المكان على مستوىً أقل من بلانك، يبدو أننا قد استخدمنا حجم الأوتار الذي لا يساوي الصفر للالتفاف حول الموضوع برمته. فهل قمنا في الحقيقة بحل أي شيء؟ أجل، لقد فعلنا. وستقوم النقطتان التاليتان بالتأكيد على ذلك.

الأولى، ما تضمنه الجدل السابق من أن المشكلة المفترضة حول التأرجحات الفضائية على مستويات أقل من طول بلانك، هي نتاج مصطنع لصياغة النسبية العامة وميكانيكا الكم في إطار الجسيمة النقطة. وبمعنى آخر، ولذلك، فإن التناقض المحوري للفيزياء النظرية المعاصرة هو في الواقع مشكلة من صنع أيدينا. ولأننا قد تصورنا في السابق أن كل جسيمات المادة وكل جسيمات القوى هي أجسام على شكل نقاط، وليس لها امتداد مكاني أبداً، لذا فقد اضطررنا أن نعتبر

خواص الكون على مستويات قصيرة مختارة. وعند المسافات الأدق دخلنا في معضلات يبدو أنها تستعصي على الحل. وتدلنا نظرية الأوتار على أننا قد واجهنا هذه المشكلات لأننا لم ندرك القواعد الحقيقية للعبة؛ فالقواعد الجديدة تنبئنا بأن هناك حدوداً للدقة التي يمكن أن نختبر بها الكون - وبشكل واقعي، هناك حدود لكيفية تطبيق مفهومنا المتفق عليه عن المسافات بدرجة من الدقة على البنية فوق المجهرية للكون. ويمكن أن نرى الآن أن التأرجحات الفراغية العاصفة المفترضة قد ظهرت في نظرياتنا لأننا لم نكن على دراية بهذه الحدود، وبالتالي قادتنا فكرة الجسيمة النقطة لنخطو خطوة كبيرة خاطئة فوق حدود الواقع الفيزيائي.

وبالوصول إلى هذا التبسيط ظاهرياً للتغلب على المعضلة بين النسبية العامة وميكانيكا الكم، لعلك تتعجب لماذا استغرق الأمر كل هذا الوقت ليقترح بعضهم أن صيغة الجسيمة النقطة هي مجرد أمر مثالي، لكن في العالم الواقعي فللجسيمات الأولية بعض من حيز مكاني. ويؤدي بنا هذا إلى النقطة الثانية. فمنذ فترة بعيدة اقترح بعض العظماء في الفيزياء النظرية من أمثال باولي وهيزنبرغ وديراك وفينمان أن مكونات الطبيعة قد لا تكون في الحقيقة مجرد نقاط بل "بقع" أو "شذرات" متموجة. غير أنهم ومعهم آخرون قد وجدوا أنه من الصعب وضع نظرية لا يكون المكون الأساسي فيها جسيمة نقطة، وتتمشى في نفس الوقت مع أغلب القوانين الفيزيائية الأساسية مثل الحفاظ على احتمالية ميكانيكا الكم (حتى لا يختفي جسم مادي فجأة من العالم من دون أن يترك أثراً) واستحالة انتقال المعلومات بسرعة أكبر من سرعة الضوء. وقد أظهرت أبحاثهم المرة تلو الأخرى من منظورات مختلفة أن واحداً أو أكثر من هذه المبادئ قد تمت مخالفته عندما أهملنا نموذج الجسيمة النقطة. ولذا ولفترة طويلة بدا وكأنه من المستحيل أن نجد نظرية كم معقولة مبنية على أي شيء غير الجسيمة النقطة. والسمة الحقيقية المؤثرة في نظرية الأوتار أنه على مدى أكثر من عشرين سنة من البحث الدقيق ظهر أنه على الرغم من وجود بعض الصفات غير المألوفة إلا أن نظرية الأوتار تحترم كل ما هو مطلوب من صفات داخلية في أية نظرية فيزيائية معقولة. والأكثر من ذلك، ومن خلال نسقها لاهتزاز الغرافيتون، فإن نظرية الأوتار نظريةُ كمٍّ تحتوي على الجاذبية.

3- الإجابة الأكثر دقة

تمسك الإجابة التقريبية بجوهر الكيفية التي تسيدت بها نظرية الأوتار حيث سقطت نظريات الجسيمات النقاط. وهكذا، إذا رغبت، فإنك تستطيع أن تنتقل إلى الجزء التالي من دون أن تفقد التسلسل المنطقي لمناقشاتنا. لكن وبعد أن قمنا

بتطوير الأفكار الأساسية للنسبية الخاصة في الفصل الثاني، فإننا نمتلك الآن الوسائل الضرورية لنشرح بدقة أكبر كيف هدّأت نظرية الأوتار من الهياج الكمي العنيف.

وفي الإجابة الأكثر دقة، سنعتمد على نفس جوهر الفكرة كما في الإجابة التقريبية، لكننا سنعبر عنها مباشرة على مستوى الأوتار. وسنقوم بذلك بعقد مقارنة بين مجسات الجسيمات النقاط ومجسات الأوتار، ببعض التفصيل. وسنرى كيف تمحو طبيعة الأوتار الممتدة المعلومات التي من الممكن الحصول عليها باستخدام مجسات الجسيمات النقاط، ولذا، مرة أخرى، سنرى كيف أن هذا سيلغي برضا تام سلوك المسافات فوق القصيرة المسؤول عن المعضلة المحورية في الفيزياء المعاصرة.

سنأخذ في اعتبارنا أولاً الطريقة التي تتداخل بها الجسيمات النقاط، إذا فرض أنها موجودة بالفعل، وبالتالي كيف يمكن أن تستخدم كمجسات فيزيائية. وأقوى التداخلات الأساسية هو الذي يحدث بين جسيمتين نقطتين تتحركان في اتجاه تصادمي بحيث يتقاطع مسارهما كما في الشكل رقم (6-5). فإذا كانت هذه الجسيمات على شكل كرات بلياردو فإنها ستتصادم وسينحرف كل منها إلى مسار جديد. وتبين نظرية مجال الكم للجسيمة النقطة أن نفس الشيء يحدث أساساً عندما تتصادم الجسيمات الأولية - فهي تتشتت بعضها عن البعض الآخر وتواصل تحركها في مسارات قد انحرفت - غير أن التفاصيل شيء مختلف.

ومن أجل البساطة، تخيل أن إحدى تلك الجسيمات إلكترون والأخرى جسيمة مضادة، بوزيترون. فعندما تصطدم المادة بالمادة المضادة فإنهما يتلاشيان متحولين إلى ومضة من الطاقة لينتج عنها مثلاً فوتون[9]. ولكي نميز بين مسار الفوتون الناتج عن المسارات السابقة للإلكترون والبوزيترون فإننا نتبع مصطلحات

الشكل رقم (6-5)



جسيمتان تتداخلان - تندفعان تجاه بعضهما - وتتسببان في انحراف مسار كل منهما.

---

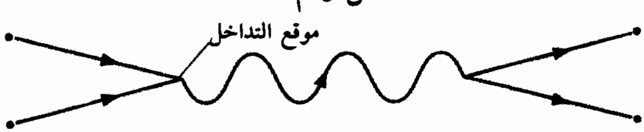
(9) يمكن للقارئ الخبير أن يدرك أن الفوتون الناتج من الصدام بين إلكترون وبوزيترون هو فوتون افتراضي، لذا فإنه لا بد من أن يتخلى عن طاقته بواسطة التفكك إلى زوج من جسيمة وجسيمة مضادة.

الفيزياء التقليدية، ونرسمه على أنه خط متموج. وعادةً سيقطع الفوتون بعض المسافة ثم يطلق الطاقة التي استقاها من زوج الإلكترون - بوزيترون، منتجاً زوجاً آخر من إلكترون - بوزيترون بالمسارات المشار إليها في أقصى يمين الشكل رقم (6-6). وفي النهاية فإن جسيمتين قد أطلقتا الواحدة تجاه الآخرى، وتتداخلان بواسطة القوى الكهرومغناطيسية، ثم تظهران في النهاية بمسارات منحرفة، وذلك في سلسلة متتابعة من الأحداث تحمل بعض التشابه مع شرحنا لتصادم كرات البلياردو.

وما يهمنا هو تفاصيل التداخل - وعلى وجه الخصوص النقطة التي يتلاشى عندها الإلكترون الأصلي والبوزيترون الأصلي لينتجا الفوتون. وكما سيظهر بجلاء، فإن الحقيقة المحورية هنا، هي أن هناك زماناً ومكاناً واضحين يمكن تحديدهما تماماً بالنسبة للحدث: الأمر موضح في الشكل رقم (6-6).

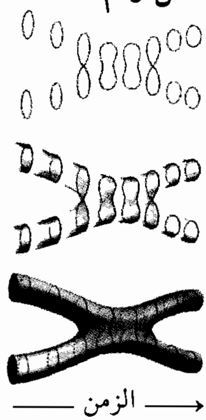
كيف يتغير هذا الوصف إذا اختبرنا الأجسام عن قرب، التي كنا نعتقد أن لها بعداً يساوي الصفر (نقطة)، واتضح أنها أوتار أحادية البعد؟ والعملية الأساسية للتداخل هي نفسها، لكن الأجسام الآن الموجودة في مسارات تصادمية عبارة عن حلقات متذبذبة كما هو واضح في الشكل رقم (6-7). فإذا كانت هذه الحلقات تهتز في أنساق رنينية مناسبة تماماً، فإنها ستعبر عن إلكترون وبوزيترون في مسار تصادمي، كما هو موضح بالضبط في الشكل رقم (6-6). ويكون السلوك كوتر حقيقي واضحاً فقط عندما نختبر المسافات متناهية الصغر، والأصغر كثيراً من أي تقنية حديثة متاحة. وكما في حالة الجسيمة النقطة، فإن الوترين يتصادمان ويتلاشيان بعضهما مع بعض في ومضة خاطفة. والومضة هي فوتون، الذي هو نفسه وتر في نسق اهتزاز معين. وبذا، فإن الوترين المتلاقيين يتداخلان بالامتزاج وإنتاج وتر ثالث كما يبدو في الشكل رقم (6-7). وتماماً كما في وصفنا للجسيمة النقطة، فإن هذا الوتر ينتقل لبرهة ثم يطلق طاقته التي اكتسبها من الوترين المتلاقيين بأن يتفكك إلى وترين يواصلان مسيرتهما. ومرة ثانية لن يظهر هذا إلا من

الشكل رقم (6-6)



في نظرية مجال الكم، تتلاشى الجسيمة والجسيمة المضادة لتنتجا فوتوناً. ويتبع ذلك أن يعطي الفوتون جسيمة أخرى وجسيمة مضادة أخرى تتحركان في مسارات مختلفة.

الشكل رقم (6-7)



(a) وتران في مسار تصادمي يمكن أن يمتزجا في وتر ثالث يمكن بدوره أن ينشطر إلى وترين ينتقلان في مسارين منحرفين. (b) نفس العملية الموضحة في (a) مؤكدة على حركة الوتر. (c) صورة بعد برهة لوترين متداخلين يجوبان العالم.

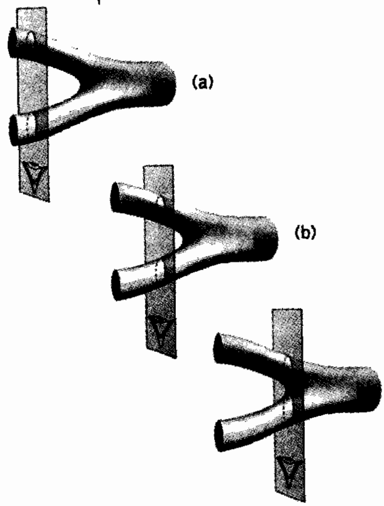
منظور مجهري فائق، وسيظهر كتداخل جسيمة نقطة كما في الشكل رقم (6-6).

ومع ذلك فإن هناك اختلافاً جوهرياً بين الحالتين. وقد أكدنا على أن تداخل الجسيمة النقطة يحدث في نقطة محددة في الزمان والمكان، وهي الموقع الذي يمكن أن يتفق عليه جميع المشاهدين. وكما سنرى الآن، فإن هذا الأمر ليس صحيحاً للتداخلات التي تحدث بين الأوتار. وسنوضح ذلك بمقارنة الكيفية التي سيصف بها التداخل كل من جورج وغريس، الموجودين في حالة حركة نسبية (كما هو موضح في الفصل الثاني). فسنرى أنهما لن يتفقا على أين ومتى تلامس الوتران لأول مرة.

ولنفعل ذلك، تصور أنك تتابع التداخل بين الوترين بآلة تصوير عدستها مفتوحة طول الوقت لتسجل كل العملية في شريط واحد[10]. وستعرض النتيجة -

(10) من الطبيعي أن آلة التصوير تعمل عن طريق تجميع الفوتونات التي تنعكس عن الأجسام التي نراها ونسجلها على الشريط الفوتوغرافي. واستخدامنا لآلة التصوير في هذا المثال أمرٌ رمزي، حيث أننا لا يمكن أن نتصور انعكاس الفوتونات من الأوتار المتصادمة. والأحرى أننا نرغب في أن نسجل في الشكل رقم (6-7)، (c) ببساطة كل عملية التداخل. وبذكر ذلك فإن علينا أن ننبه إلى نقطة تخطيناها في متن الكتاب. فقد عرفنا من الفصل الرابع أننا يمكن أن نصوغ ميكانيكا الكم باستخدام طريقة جمع كل المسارات لفينمان والتي نحلل فيها حركة الأجسام بواسطة تجميع المساهمات من "جميع" المسارات =

الشكل رقم (6-8)

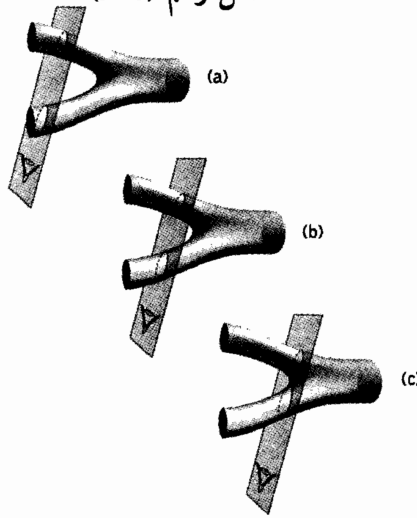


الوتران المتلاقيان في ثلاث لحظات متتالية. في (a) و (b) نرى اقتراب الوترين، وفي (c) يتلامس الوتران لأول مرة من وجهة نظر جورج.

والمعروفة باسم "اللوحة العالمية للوتر" - في الشكل رقم (6-7). وبتقطيع اللوحة العالمية إلى قطع متوازية - تماماً كما نقطع قالب خبز - فإننا يمكن أن نسترجع لحظة بلحظة تداخل الأوتار. ويوضح الشكل رقم (6-8) مثالاً لهذا التقطيع، وفي الشكل رقم (6-8)، (a) بالتحديد نوضح تركيز اهتمام جورج على الوترين المتلاقيين. وقد زودنا الشكل بمستوى قاطع يقطع كل الأحداث التي تحدث في الفضاء في نفس اللحظة من منظور جورج. وكما فعلنا غالباً في الفصول السابقة فإننا سنلغي واحداً من الأبعاد المكانية في هذا الشكل لزيادة التوضيح. أما في الواقع فهناك طبعاً أبعاد ثلاثة للأحداث التي تجري في نفس اللحظة بالنسبة لأي مشاهد. ويبين الشكل رقم (6-8)، (a) و(b) لقطتين في زمنين

= المحتملة فيما بين نقطة بداية ونقطة نهاية (كل مسار يساهم بقيمة تتحدد إحصائياً بواسطة فينمان). وقد بيّنا في الشكلين رقمي (6-6) و(6-7) أحد المسارات المحتملة لجسيمة نقطة من بين عدد لانهائي منها (الشكل رقم (6-6))، أو مسار أحد الأوتار (الشكل رقم (6-7)) وذلك بتتبع مسارها من موضعها الأصلي حتى نقطة نهاية المسار. وتنطبق المناقشة في هذا المقطع على أي مسار محتمل آخر، وبالتالي فهي تنطبق على كل العملية الكمية نفسها. (عُمِّمت صياغة فينمان لميكانيكا الكم للجسيمة النقطة - في إطار كل المسارات - على نظرية الأوتار من خلال أبحاث ستانلي ماندلشتام من جامعة كاليفورنيا في بيركلي وبواسطة الفيزيائي الروسي ألكسندر بولياكوف الموجود حالياً في قسم الفيزياء بجامعة برينستون).

الشكل رقم (6-9)



الوتران الملتقيان في ثلاث لحظات متتالية. في (a) و(b) يقترب الوتران الواحد من الآخر؛ وفي (c) يتلامسان للمرة الأولى، من منظور غريس.

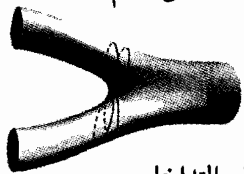
متتابعين - شريحتين متتاليتين من اللوحة العالمية توضحان كيف يرى جورج الوترين لدى اقترابهما الواحد من الآخر. وللأهمية المحورية، فإننا قد بينا في الشكل رقم (6-8)، (c) لحظة الزمن، من وجهة نظر جورج، التي تلامس عندها الوتران لأول مرة واندمجا معا لينتجا الوتر الثالث.

ولنفعل الآن نفس الشيء مع غريس. وتتضمن الحركة النسبية لجورج وغريس، كما وضحنا في الفصل الثاني، أنهما لا يتفقان حول حدوث الأحداث في نفس الوقت. ومن منظور غريس فإن اللوحة العالمية في الشكل رقم (6-7)، (c) لابد أن تقطع إلى شرائح بزوايا مختلفة لكي تتضح لحظة بلحظة خطوات التداخل.

وفي الشكل رقم (6-9)، (b) و(c) قد بينا اللحظات المتتالية الآن من منظور غريس متضمنة تلك اللحظة التي ترى فيها الوترين المتلاقيين يتلامسان لينتجا الوتر الثالث.

وبمقارنة الشكلين رقمي (6-8)، (c) و(6-9)، (c) كما هو موضح في الشكل رقم (6-10)، فإننا سنرى أن جورج وغريس لن يتفقا أين ومتى التقى الوتران الأصليان لأول مرة - أي أين سيحدث التداخل. ويؤكد كون الوتر جسم

الشكل رقم (6-10)



لا يتفق جورج وغريس على موقع التداخل.

ممتد أن لا غرابة هناك في موقعه في المكان والزمان عندما يتداخل الوتران لأول مرة - وبالأحرى فإن الأمر يعتمد على حالة حركة المشاهد.

وإذا طبقنا نفس المنطق على تداخل الجسيمات النقاط، كما هو معروض بإيجاز في الشكل رقم (6-11) فإننا سنعيد التوصل إلى نفس الاستنتاج الذي توصلنا إليه سابقاً - هناك نقطة محددة في المكان ولحظة محددة في الزمان عندما تتداخل الجسيمات النقاط. تتزاحم كل تداخلات الجسيمات النقاط في نقطة محددة. وعندما تكون القوى المعنية في التداخل هي قوى جاذبية - أي عندما تكون الجسيمة المرسال في هذا التداخل هي الغرافيتون بدلاً من الفوتون - فإن تزاحم (حشر) مجموع القوى في نقطة وحيدة يؤدي إلى نتائج كارثية، مثل الإجابة بلا نهاية التي أشرنا إليها سابقاً. وعلى النقيض فإن الأوتار "تطمس" المكان الذي يحدث فيه التداخل. ولأن المشاهدين المختلفين يرون أن التداخل يحدث في مواقع مختلفة على طول الجزء الأيسر من السطح في الشكل رقم (6-10)، فإن ذلك في الواقع يعني أن موقع التداخل قد طمس هو الآخر بالنسبة لهم جميعاً.

الشكل رقم (6-11)



يتفق المشاهدون الموجودون في حركة نسبية على مكان وزمان التداخل بين جسيمتين نقطتين.

ويؤدي ذلك إلى انتشار مجموعة القوى، وفي حالة قوى الجاذبية، فإن طمس الموقع يخفف من خواصها فوق المجهرية بدرجة ملحوظة - لدرجة أن الحسابات ستفضي إلى إجابات محددة معقولة بدلاً من اللانهائيات المذكورة سابقاً. وهذه صورة أخرى أكثر دقة لعملية الطمس التي قابلناها في الإجابة التقريبية في نهاية الجزء الأخير. مرة أخرى، فإن هذا الطمس يؤدي إلى تهدئة الاضطرابات فوق المجهرية للمكان عندما تتناقص المسافات الأقل من طول بلانك بعضها مع بعض.

ومثلما ننظر إلى العالم من خلال عدسات ضعيفة جداً أو قوية جداً، فإن التفاصيل الأقل من أبعاد بلانك والتي يمكن أن تكون متاحة لمجس من جسيمة نقطة، تطمس مع بعضها بواسطة نظرية الأوتار لتصبح غير ضارة. وعلى عكس حالة إنسان ضعيف البصر، إذا كانت نظرية الأوتار هي الوصف النهائي للكون، فلا توجد عدسات لتصحيح الوضع حتى تصبح التأرجحات في مستويات أقل من بلانك واضحة. وعدم التوافق بين النسبية العامة وميكانيكا الكم والذي يظهر فقط في المسافات الأقل من مقياس بلانك - يمكن تجنبه في عالم له حدود دنيا للمسافات التي يمكن الوصول إليها أو حتى يمكن الزعم بأنها موجودة بالمعنى العام. وهذا هو الكون كما تصفه نظرية الأوتار، والذي نرى فيه أن قوانين الأشياء الصغيرة والأشياء الكبيرة يمكن أن تمتزج معاً بتجانس، حيث أننا باختصار قد تغلبنا على الكارثة التي من المفترض أن تظهر عند المسافات فوق المجهرية.

سابعاً: ما الذي وراء الأوتار؟

الأوتار شيء مميز لسببين: الأول، أنه على الرغم من أنها تشغل حيزاً مكانياً ممتداً إلا أنه يمكن وصفها دائماً في إطار ميكانيكا الكم. والسبب الثاني، أنه من بين الأنساق الرنينية للاهتزازات هناك نسق واحد له خواص الغرافيتون، وبذا يتأكد أن قوى الجاذبية مكون ذاتي في بنية الأوتار. ولكن، تماماً كما بينت نظرية الأوتار أن المفهوم المتفق عليه بأن الجسيمات النقاط ليس لها بُعْد، قد ظهر بأنه شيء رياضي مثالي لا وجود له في العالم الواقعي، فهل يمكن أن يكون الأمر بالنسبة لجديلة وتر أحادية البعد سمكها في غاية الرقة، أن تكون هي الأخرى شيئاً رياضياً مثالياً؟ وهل يمكن في الواقع أن يكون للأوتار سُمْك ما - مثل سطح الإطار الداخلي لدراجة ثنائي الأبعاد - أو حتى بشكل أكثر واقعية مثل كعكة رقيقة ثلاثية الأبعاد؟ وقد أحرجت الصعوبات التي لا يمكن التغلب عليها، والتي اكتشفها هيزنبرغ وديراك وآخرون أثناء محاولاتهم صياغة نظرية كَمٍّ للشظايا ثلاثية الأبعاد أحرجت مراراً الباحثين الذين سلكوا هذا التسلسل الطبيعي من المنطق.

وعلى غير المتوقع تماماً، وخلال منتصف التسعينيات من القرن العشرين، أيقن منظرو نظرية الأوتار من خلال البراهين غير المباشرة، بل والذكية، أن مثل هذه الأجسام الأساسية ذات الأبعاد الأكثر تلعب في الواقع دوراً هاماً وحساساً في نظرية الأوتار نفسها. وقد تحقق الباحثون بالتدريج من أن نظرية الأوتار ليست نظرية للأوتار فقط. ومن الملاحظات الخطيرة، التي تعتبر محورية بالنسبة لثورة الأوتار الفائقة الثانية، التي بدأها ويتن وآخرون في العام 1995، أن نظرية الأوتار تتضمن في الواقع مكونات لها أبعاد مختلفة متنوعة: مكونات مثل الأطباق في لعبة الأطباق الطائرة ذات البعدين، ومكونات مثل اللطعة لها ثلاثة أبعاد، ومكونات أكثر غرابة تتضمنها النظرية. وسنأخذ هذه الاكتشافات الأحدث في اعتبارنا في الفصلين 13، و14. أما الآن فسنواصل تتبعنا للمسار التاريخي واختبارنا للخواص الجديدة المدهشة لعالم قد بُني من أوتار أحادية البعد بدلاً من جسيمات نقاط ليس لها بعد.

الفصل السابع

التفوق في الأوتار الفائقة

عندما نجحت بعثة إدينغتون في العام 1919 في قياس انحراف ضوء نجم بواسطة الشمس كما توقع آينشتاين، أرسل عالم الفيزياء الهولندي هندريك لورنس برقية إلى آينشتاين بالأخبار الطيبة وعندما أذيعت كلمات البرقية المؤكدة للنسبية العامة سأل أحد الطلاب آينشتاين عما يمكن أن يفكر فيه إذا لم تكتشف تجربة أدينغون الانحراف المتوقع لضوء النجم، أجاب آينشتاين: "سأكون آسفاً لما حدث للورد العزيز، لأن النظرية صحيحة"[(1)]. ومن الطبيعي أنه إذا فشلت التجارب في الواقع في إثبات تنبؤات آينشتاين، فإن النظرية لن تكون صحيحة، ولن تصبح النسبية العامة إحدى دعامات الفيزياء الحديثة. غير أن ما كان يعنيه آينشتاين هو أن النسبية العامة تصف الجاذبية بروعة عظيمة وبأفكار بسيطة لكنها قوية لدرجة أنه وجد من الصعب أن نتخيل أن الطبيعة يمكن ألا تلتفت إليها. كانت النسبية العامة من وجهة نظر آينشتاين على درجة من الجمال يصعب معها أن تكون غير صحيحة.

لكن الأحكام الجمالية ليست كافية لإجازة المنهج العلمي. وفي النهاية فإن ما يحكم نجاح النظريات هو إلى أي مدى تواجه هذه النظريات الحقائق التجريبية الجافة المجردة. لكن الملحوظة الأخيرة معرضة لكثير من المتطلبات الهامة. فعندما توضع نظرية ما، فإن الحالة غير النهائية لتطورها غالباً ما تمنع اختبار نتائجها بالتفصيل تجريبياً. ومع ذلك، فعلى علماء الفيزياء أن يعملوا اختيارهم وأن يمارسوا حكمهم حول الكيفية والاتجاه الذي يوجهون نحوه استكمال نظرياتهم غير المكتملة. ويفرض تناسق المنطق الداخلي بعض هذه القرارات، وبالقطع فإن الأمر يتطلب في أي نظرية معقولة أن تتجنب أية غرابة منطقية. ويحكم بعض القرارات الأخرى إدراك التضمينات الكيفية التجريبية لإحدى البنى النظرية بالنسبة لبنية أخرى. ونحن لا نهتم بالنظرية التي لا تتضمن المقدرة على تمثيل أي شيء

(1) آلبرت آينشتاين، مقتطفة من أقواله في كتاب: R. Clark, Einstein: *The Life and Times* (New York: Avon Books, 1984), p. 287.

من تلك الأشياء التي تقابلنا في العالم من حولنا. ولكن بالتأكيد هناك حالات لبعض القرارات التي يتخذها الفيزيائيون النظريون مبنية على حس جمالي - وهو الحس الذي يعني أن للنظرية أناقة وجمالاً في البنية يتمشيان مع العالم الذي نعيش فيه. وطبعاً، لا يوجد أي شيء يؤكد أن هذه الاستراتيجية تؤدي إلى الحقيقة. وربما يكون العالم في أعماقه ذا بنية أقل أناقة مما كنا نعتقد من خلال خبراتنا، أو ربما نجد أن الخصائص الحالية تتطلب تنقيحاً واضحاً عند تطبيقها في مجالات أقل ألفة. وبالرغم من ذلك، وعندما نقتحم عصراً تصف فيه نظرياتنا مجالات من العالم تتزايد صعوبة اختبارها تجريبياً، فإن علماء الفيزياء يعتمدون على مثل هذه النواحي الجمالية لتساعدهم في السير بسهولة في مسارات معتمة وفي طرق مسدودة لا يمكن أن يقتفوها إذا لم تتوفر هذه النواحي الجمالية. وحتى هذه اللحظة فقد قدم هذا المنطلق دليلاً قويًا وثاقباً..

والتناظر يشكل جزءاً هاماً في النواحي الجمالية في الفيزياء كما في الفن. لكن على عكس الفن، فإن التناظر في الفيزياء له مفهوم صلب ودقيق جداً. وفي الحقيقة إذا تتبعنا بعناية هذا المفهوم الدقيق عن التناظر حتى نتائجه الرياضية، فإن الفيزيائيين قد اكتشفوا خلال العقود القليلة الأخيرة نظريات فيها الجسيمات المادية والجسيمات الرسولة مجدولة بصورة أقوى بكثير مما كان يعتقد أي إنسان من قبل احتمال وجودها. ولمثل هذه النظريات التي لا توحد قوى الطبيعة فقط بل المكونات المادية أيضاً، أعلى درجة ممكنة من التناظر، ولهذا السبب يقال إنها "متناظرة فائقة" - فائقة التناظر Supersymmetric. وكما سنرى، فإن نظرية الأوتار الفائقة هي السلف والنموذج الرفيع لإطار فائق التناظر.

أولاً: طبيعة القانون الفيزيائي

تخيل عالماً تتغير فيه قوانين الفيزياء سريعاً كما تتغير الموضة من سنة لسنة أو من أسبوع لأسبوع أو حتى من لحظة لأخرى. وإذا افترضنا أن في مثل هذا العالم لا تتسبب تلك التغيرات في اضطراب العمليات الأساسية للحياة، فإن أقل ما يمكن أن يقال هو أنك لن تمر عليك لحظة ملل واحدة. وقد يصبح أبسط الأحداث مخاطرة حيث إن الاختلافات العشوائية ستمنعك وتمنع أي إنسان آخر من استخدام الخبرات السابقة للتنبؤ بأي شيء عن المستقبل.

ومثل هذا العالم كابوس بالنسبة لعلماء الفيزياء، فعلماء الفيزياء - ومثل أغلب الناس - يعتمدون أساساً على ثبات العالم: فالقوانين الصحيحة اليوم كانت كذلك بالأمس، وستصبح صحيحة أيضاً في الغد (حتى إذا لم نكن من المهارة

بحيث نتمكن من فهمها كلها). وفوق كل ذلك، ما الذي يعنيه تعبير "قانون" إذا كان يتغير بصورة فجائية؟ ولا يعني ذلك أن العالم إستاتيكي، فالعالم بكل تأكيد يتغير بطرق لا تحصى من لحظة لأخرى، وبالأحرى، فإن القوانين التي تحكم هذا التطور هي الثابتة لا تتغير . وقد نتساءل عما إذا كنا نعلم حقيقة أن هذا صحيح. في الواقع نحن لا نعرف. لكن نجاحنا في وصف السمات العديدة للكون منذ برهة صغيرة بعد الانفجار الهائل وحتى وقتنا هذا يؤكد لنا أنه إذا كانت هذه القوانين تتغير فإن ذلك لا بد من أن يكون في غاية البطء. وأبسط الافتراضات التي تتواءم مع كل ما نعرفه هو أن تلك القوانين ثابتة.

والآن، تخيل عالماً تتنوع فيه قوانين الفيزياء كما تتنوع الثقافات المحلية وتتغير بشكل حاد غير متوقع من مكان لآخر وتقاوم بشراسة أي مؤثر خارجي في تشكيلها. وكما في مغامرات غاليفر، الذي يسافر في مثل هذا العالم فإن ذلك سيعرضك إلى عالم غني جداً بالخيرات غير المتوقعة. لكن هذا كابوس آخر في نظر الفيزيائيين. ومن الصعوبة بمكان مثلاً، أن نتعايش مع حقيقة أن القوانين الصحيحة في بلد ما - أو ولاية ما - قد تكون غير صحيحة في بلد أو ولاية أخرى. لكن فلنتخيل ما الذي ستكون عليه الأشياء إذا أصبحت قوانين الطبيعة تتغير بهذا الشكل. وفي عالم مثل هذا فإن التجارب التي تجري في موقع ما لن يكون لها أي تأثير على قوانين الفيزياء المناسبة في مكان آخر. وفي المقابل، سيكون على الفيزيائيين أن يعيدوا إجراء التجارب مرات ومرات في المواقع المختلفة ليختبروا قوانين الطبيعة المحلية التي تسوء في كل موقع. والحمد لله، فإن كل ما نعرفه يشير إلى أن قوانين الفيزياء هي نفسها في كل مكان. وتدور كل التجارب التي تجمع العالم على نفس مجموعة التفسيرات الفيزيائية. والأكثر من ذلك، فإن مقدرتنا على شرح عدد هائل من المشاهدات الفلكية لمناطق من الكون شاسعة البعد باستخدام مجموعة ثابتة من مبادئ الفيزياء، كمثال، تؤدي بنا للاعتقاد بأن نفس القوانين صالحة في كل مكان. وبما أننا لم نسافر إلى الطرف الآخر من الكون، فإننا لا نستطيع أن نجزم بأن هناك نوعاً جديداً من الفيزياء يسود في مكان آخر، لكن كل الأمور تشير إلى النقيض.

ومرة أخرى فإن ذلك لا يعني أن الكون يبدو واحداً - أو له نفس الخواص التفصيلية - في المواقع المختلفة. ورائد الفضاء الذي يقفز بالزانة فوق سطح القمر يمكن أن يأتي بكل أنواع الأفعال التي لا يمكنه القيام بها على الأرض. لكننا نقر بأن هذا الاختلاف ينشأ لأن للقمر كتلة أقل كثافة كثيراً من كتلة الأرض؛ ولا يعني ذلك أن قوانين الجاذبية تتغير بطريقة ما من مكان إلى آخر. فقانون نيوتن أو قانون

آينشتاين، لنكون أكثر دقة، للجاذبية، هو نفسه على الأرض وعلى القمر. والاختلاف في ما صادفه رائد الفضاء هو اختلاف في التفاصيل البيئية وليس اختلافا في القانون الفيزيائي.

استخدامها - كتناظرات في الطبيعة. ويعني الفيزيائيون بذلك أن الطبيعة تتعامل مع كل لحظة من الزمن وكل موقع في المكان بنفس الطريقة - بتناظر - مؤكدة بذلك أن القوانين الأساسية هي نفسها السائدة. ومثل هذه التناظرات مقنعة بشدة تماماً بنفس الطريقة التي تؤثر بها في الفن والموسيقى؛ وهي تبرز النظام والتماسك في عمل الطبيعة. وأناقة وغِنَى وتعقُّد وتنوُّع الظواهر التي تنشأ من مجموعة بسيطة من القوانين الكونية هي على الأقل جزء مما يعنيه الفيزيائيون عندما يستخدمون تعبير "جميلة".

وقد توصلنا في مناقشاتنا لنظرية النسبية الخاصة والعامة إلى تناظرات أخرى للطبيعة. وإذا استرجعنا مبدأ النسبية الذي هو لب النسبية الخاصة، فإن ذلك يدلنا على أن كل القوانين الفيزيائية لا بد أن تكون واحدة بصرف النظر عن الحركة النسبية الدائمة التي قد يكون عليها المشاهدون كل على حدة. وهذا تناظر لأنه يعني أن الطبيعة تتعامل مع مثل هؤلاء المشاهدين بنفس الطريقة، أي بتناظر. ونجد العذر لكل واحد من مثل هؤلاء المشاهدين في أنه يعتبر نفسه أو تعتبر نفسها في حالة سكون. ومرة أخرى، لن يصل المشاهدون الموجودون في حالة حركة نسبية إلى نفس المشاهدات كما رأينا من قبل، فهناك كل أنواع الاختلافات المذهلة في مشاهداتهم. وفي المقابل وكما في حالة خبرات القفز بالزانة على الأرض وعلى القمر، فإن الفروق في المشاهدات تعكس التفاصيل البيئية - المشاهدون في حالة حركة نسبية - حتى بالرغم من أن المشاهدات محكومة بنفس القوانين.

ومن خلال مبدأ التكافؤ في النسبية العامة، وسَّع آينشتاين من هذا التناظر بشكل ملحوظ، وذلك بأن بيَّن أن قوانين الفيزياء هي في الحقيقة واحدة بالنسبة لكل المشاهدين، حتى إذا كانوا واقعين تحت حركة معقدة متسارعة. ولنسترجع ما توصل إليه آينشتاين من تحققه من أن المشاهد المتسارع له تمام الحق في أن يعلن أنه أو أنها في حالة سكون، وأن القوى التي يشعر بها هي نتيجة مجال الجاذبية. وبمجرد تضمين الجاذبية في إطار النظرية، فإن كل نقاط التفضيل للمشاهدة تقف على قدم المساواة تماماً. وعدا إغراء النواحي الجمالية الذاتية لهذا التعامل المتساوي لكل أنواع الحركة، فقد رأينا أن مبادئ هذا التناظر تلعب دوراً محورياً في الاستنتاجات المذهلة في ما يتعلق بالجاذبية التي اكتشفها آينشتاين.

ترى هل هناك مبادئ تناظر أخرى لها علاقة بالمكان والزمان والحركة يجب

على قوانين الطبيعة أن تحترمها؟ وإذا فكرت في ذلك فربما نتوصل إلى احتمال آخر. ولا يجب أن تتأثر قوانين الفيزياء بالزاوية التي نجري مشاهداتنا منها. فمثلاً، إذا كنت تجري تجربة ما ثم قررت أن تغير من موقع أجهزتك وتجري التجربة مرة أخرى، فإن نفس القوانين يجب أن تسود. ويعرف ذلك بالتناظر الدوراني، ما يعني أن قوانين الفيزياء تتعامل مع كل الاتجاهات المحتملة على قدم المساواة. ومبدأ التناظر هذا متوافق تماماً مع مبادئ التناظر التي سبق مناقشتها.

هل هناك تناظرات أخرى؟ وهل أغفلنا أي تناظرات؟ فقد تقترح أن هناك تناظرات قياسية تترافق مع القوى غير الجاذبية كما هو مبين في الفصل الخامس. ومن المؤكد أن هذه تناظرات في الطبيعة، إلا أنها من نوع أكثر تجريداً؛ وسينصب تركيزنا هنا على التناظرات التي لها علاقة مباشرة بالمكان والزمان والحركة. وبوضع هذا القيد، فإنك لا يمكن أن تفكر في احتمالات أخرى. وفي الحقيقة فإنه في العام 1967، تمكن الفيزيائيان سيدني كولمان وجيفري مانديولا من إثبات أنه لا يوجد أي تناظر آخر يرتبط بالمكان والزمان والحركة يمكن أن يضم إلى التناظرات التي شرحناها حالاً ويعطي نظرية تحمل أي تشابه مع عالمنا.

وتبعاً لذلك، فإن الفحص الدقيق لهذه الفرضية بالاعتماد على بصيرة عدد من الفيزيائيين قد كشف بدقة عن عيب بارز: لم تستغل نتيجة كولمان – مانديولا بشكل كامل التناظرات التي تتأثر بما يعرف بالحركة المغزلية.

ثانياً الحركة المغزلية

يمكن أن تدور جسيمة أولية مثل الإلكترون حول نواة ذرية بنفس الطريقة تقريباً التي تدور بها الأرض حول الشمس. لكن في الوصف التقليدي للإلكترون كجسيمة نقطة، يبدو أنه لا تشابه هناك مع دوران الأرض حول محورها (في حركة مغزلية). وعندما يدور جسم حول نفسه (في حركة مغزلية) فإن النقاط الموجودة على محور الدوران – كما هو الحال في نقطة المركز في طبق فريسبي الدوار (Frisbee) – لا تتحرك. وإذا كان هناك أي شيء مثل النقطة بالفعل، فإنه لا يملك "نقاطاً أخرى" تقع خارج محور الدوران المعني. وبذلك قد يبدو أنه لا يوجد مفهوم لدوران مغزلي لجسم على شكل نقطة. ومنذ سنوات كثيرة مضت، فإن مثل هذا المنطق سقط ضحية لمفاجأة أخرى من ميكانيكا الكم.

وفي العام 1925، تحقق عالما الفضاء الهولنديان جورج أولينبيك وصمويل غودسميث من أن كثيراً من البيانات المحيرة والمتعلقة بخواص الضوء المنبعث والممتص بواسطة الذرات، يمكن تفسيرها إذا افترضنا أن للإلكترونات خواص

مغناطيسية من نوع خاص جداً وقد بين العالم الفرنسي أندريه - ماري أمبير منذ بضع مئات من السنين، أن المغناطيسية تنتج من حركة الشحنة الكهربية. وقد تتبع أولينبيك وغودسميث هذا الخط واكتشفا أن هناك نوعاً معيناً واحداً فقط من حركة الإلكترون هو الذي يمكن أن يعطي الخواص المغناطيسية التي جاءت بها البيانات: الحركة الدورانية - أي الحركة المغزلية. وهكذا، على النقيض من التوقعات التقليدية، أعلن كل من أولينبيك وغودسميث أن الإلكترونات تشبه الأرض إلى حد ما في كونها تدور حول النواة وتدور حول نفسها (في حركة مغزلية).

هل كان أولينبيك وغودسميث يعنيان حرفياً أن الإلكترون يدور في حركة مغزلية؟ نعم ولا. والأمر الذي بينته أبحاثهما بالفعل هو أن هناك مفهوماً من ميكانيكا الكم حول الحركة المغزلية التي تشبه إلى حد ما الصورة العادية. لكن لها طبيعة كمية (من ميكانيكا الكم). إنها واحدة من تلك الخواص الخاصة المجهري والتي تعيد صقل الأفكار الكلاسيكية لكنها تدخل مفهوم الكم المحقق تجريبياً فمثلاً تخيل لاعبة تزلج على الجليد وهي تدور في حركة مغزلية. فإذا ضمت ذراعيها إلى الداخل تزداد سرعة دورانها حول نفسها بينما إذا مدت ذراعيها إلى الخارج فإن دورانها حول نفسها يتباطأ. وآجلاً أو عاجلاً ستبطئ الحركة وتتوقف في النهاية اعتماداً على السرعة التي كانت تدور بها. ويختلف هذا الأمر عن نوع الحركة المغزلية التي تناولها أولينبيك وغودسميث. وتبعاً لأبحاثهما وللدراسات التي تبعت ذلك، فإن كل إلكترون في الكون يتحرك حركة مغزلية دائماً وأبداً بمعدل واحد ثابت لا يتغير أبداً. وحركة الإلكترون المغزلية ليست حالة حركة عابرة مثل كثير من الأشياء المألوفة والتي قد تدور في حركة مغزلية لسبب أو لآخر. وبدلاً من ذلك فإن دوران الإلكترون حول نفسه هو خاصية ذاتية تشبه كثيراً كتلته أو شحنته الكهربية. فإذا لم يقم الإلكترون بالدوران في حركة مغزلية، فإنه لن يصبح إلكتروناً.

وبالرغم من أن الأبحاث المبكرة قد تركزت على الإلكترون، إلا أن الفيزيائيين قد بينوا في ما بعد أن هذه الأفكار عن الحركة المغزلية تنطبق بنفس الشكل على كل جسيمات المادة الموجودة ضمن العائلات الثلاث في الجدول رقم (1-1). وهذا الأمر صحيح حتى أدق التفاصيل: فكل جسيمات المادة (ورفاقها من جسيمات المادة المضادة كذلك) لها حركة مغزلية مساوية لحركة الإلكترون المغزلية. ففي لغة التخصص، يقول الفيزيائيون إن جسيمات المادة كلها لها سبين Spin - حركة مغزلية "سبين - $1/2$"، حيث قيمة $1/2$ تشير بصفة عامة

لأحد مقاييس ميكانيكا الكم عن مدى سرعة دوران الإلكترون حول نفسه[2]. وفوق ذلك، بيَّن الفيزيائيون أن ناقلات القوى اللاجاذبية - الفوتونات والبوزونات الضعيفة القياسية والغليونات - لها أيضاً خاصية مغزلية ذاتية، اتضح أنها "ضعف" تلك التي لجسيمات المادة. وكلها تملك "سبين - 1".

وماذا عن الجاذبية؟ تمكن الفيزيائيون، حتى من قبل ظهور نظرية الأوتار، من تعيين قيمة "سبين" التي يجب على الغرافيتون المفترض أن يمتلكها لكي يكون ناقلاً لقوى الجاذبية. والإجابة هي: ضعف قيمة الحركة المغزلية "سبين" للفوتونات والبوزونات القياسية الضعيفة والغليونات - أي "سبين - 2".

وفي مضمون نظرية الأوتار تكون الحركة المغزلية "سبين" - مثل الكتلة وشحنات القوى - تصاحب نسق الاهتزاز الذي يحدثه الوتر. وكما في حالة الجسيمات النقاط فإن الأمر هنا خادع بعض الشيء أن نظن أن الحركة المغزلية للوتر ناتجة من دورانه حول نفسه في المكان في حركة مغزلية، لكن هذه الصورة تعطي انطباعاً غير دقيق في الذهن. وبهذه المناسبة، يمكن الآن أن نوضح أمراً هاماً كنا قد قابلناه من قبل. في العام 1974 عندما أعلن تشيرك وشوارتز أنه يجب اعتبار نظرية الأوتار نظرية كم متضمنة لقوى الجاذبية، فقد أعلنا ذلك لأنهما وجدا أن للأوتار "بالضرورة" نسقاً اهتزازياً في رصيدها، وهو لا كتلة له وله قيمة سبين - 2، وهي السمات المميزة للغرافيتون. وحيث يوجد الغرافيتون توجد الجاذبية.

وبهذه الخلفية عن مفهوم الحركة المغزلية "سبين" من الممكن الآن أن نتحول إلى الدور الذي تلعبه في الكشف عن الثغرات الموجودة في نتائج كولمان - مانديولا المتعلقة بالتناظرات المحتملة في الطبيعة والتي سبق ذكرها في الجزء السابق.

ثالثاً: التناظر الفائق والشركاء الفائقون

وكما أكدنا من قبل، فإن مفهوم الحركة المغزلية، على الرغم من أنه يشبه ظاهرياً صورة الحركة المغزلية العادية، إلا أنه يختلف في الأساس المتأصل في ميكانيكا الكم. وقد أوضح اكتشافها في العام 1925 أن هناك نوعاً آخر من الحركة الدورانية التي ببساطة لا توجد في العالم الكلاسيكي البحت.

يوعز ذلك بالسؤال الآتي: هل من الممكن أن تؤدي الحركة الدورانية الرقيقة

---

(2) بصورة أكثر دقة، سبين 2/1 يعني أن العزم الزاوي Angular Momentum للإلكترون نتيجة حركته المغزلية Spin هو $\frac{\hbar}{2}$.

المصاحبة للحركة المغزلية إلى تناظر محتمل آخر لقوانين الطبيعة؟ تماماً كما تسمح الحركة الدورانية العادية بمبدأ التناظر لعدم التغير الدوراني ("تتعامل الفيزياء مع كل الاتجاهات المكانية على قدم المساواة"). وحوالي 1971 أوضح الفيزيائيون أن الإجابة عن هذا السؤال هي نعم. وعلى الرغم من أن الرواية الكاملة متشعبة تماماً، إلا أن الفكرة الأساسية هي أنه عندما نأخذ الحركة المغزلية في الاعتبار فإن هناك بالضبط تناظراً واحداً آخر لقوانين الطبيعة، وهو الممكن رياضياً. ويسمى التناظر الفائق (Supersymmetry)[3].

ولا يمكن أن يصاحب التناظر الفائق تغير حدسي بسيط في نقاط التفضيل المشاهدة مثل التحولات في الزمن، وفي المواقع الفضائية، وفي التوجه الزاوي، وفي السرعة الموجهة للحركة، وهي كلها تستهلك هذه الاحتمالات. لكن تماماً مثلما أن الحركة المغزلية "تشبه الحركة الدورانية، لكن مع تحريف كمي" فإن التناظر الفائق يمكن أن يصاحب التغير في نقطة تفضيل في المشاهدة في "امتداد كمي في المكان والزمان". والعبارات بين علامات التنصيص لها أهمية خاصة، لأن الجملة الأخيرة قد قُصد بها فقط أن تعطي شعوراً عاماً بموقع التناظر الفائق في الإطار الأكبر العام لمبادئ التناظر[4]. إلا أنه على الرغم من إدراكنا أن التناظر الفائق أمرٌ صحيح، فإننا سنركز على واحد من "تضميناته الأولية" - آخذين في اعتبارنا أن الطبيعة تتضمن مبادئه - وهو أمر أسهل كثيراً في فهمه.

في بداية السبعينيات من القرن العشرين أيقن الفيزيائيون أن الكون متناظر فائق، ولا بد للجسيمات في الطبيعة أن تتواجد في أزواج تختلف في قيمة الحركة المغزلية "سبين" بمقدار نصف وحدة. وتسمى مثل هذه الأزواج من الجسيمات "بالشركاء الفائقين" بصرف النظر عما إذا كانت جسيمة نقطة (كما في النموذج القياسي) أو حلقات دقيقة متذبذبة. وحيث أن لجسيمات المادة حركة مغزلية

(3) كان لاكتشاف وتطوير التناظر الفائق تاريخ معقد. فبجانب ما ورد في متن الكتاب ساهم كثيرون مساهمات أساسية في ذلك، من بينهم: R. Haag, M. Sohnius, J. T. Lopuszanski, Y. A. Gol'fand, E. P. Lichtman, J. L. Gervais, B. Sakita, V. P. Akulov, D. V. Volkov, and V. A. Soroka.

وقد تم توثيق بعض أبحاثهم في: Rosanne Di Stefano, *Notes on the Conceptual Development of Supersymmetry* (NewYork: Institute of Theoretical Physics, State University of New York Stony Brook, [n.d.]), Preprint ITP-SB-8878.

(4) وللقارئ ذي الميول الرياضية نشير هنا أن هذا الامتداد يتضمن زيادة الإحداثيات الديكارتية المألوفة للزمكان بإحداثيات كمية جديدة مثل u، *u* غير قابلة للاستبدال (Anticommuting) *uxv* = -*vxu* وعندئذٍ يمكن تصور التناظر الفائق كترجمة إلى هذه الصورة الكمية المضافة للزمكان.

مقدارها $^1/_2$، بينما للجسيمات المراسلة حركة مغزلية مقدارها 1، فإن التناظر الفائق يبدو أنه نتيجة تزاوج - مشاركة - بين جسيمات المادة وجسيمات القوة. وهكذا يبدو الأمر وكأنه مفهوم توحد رائع. غير أن المشكلة تأتي في التفاصيل.

في منتصف السبعينيات من القرن العشرين، عندما أراد الفيزيائيون أن يضمنوا التناظر الفائق في النموذج القياسي، فإنهم لم يجدوا أية جسيمة معروفة - الموجودة في الجدولين رقمي (1-1) و(1-2) - يمكن أن تكون شريكاً فائقاً بعضها مع البعض. وبدلاً من ذلك، فإن التحليل النظري التفصيلي قد بين أنه إذا تضمن الكون تناظراً فائقاً، فإن كل جسيمة معروفة لا بد من أن يكون لها جسيمة شريكة فائقة ولو لم تكن قد اكتشفت بعد، بحيث تكون قيمة الحركة المغزلية لها أقل من شريكتها بمقدار نصف وحدة. فمثلاً لا بد من أن يكون هناك شريك للإلكترون قيمة سبين له صفر؛ وقد أطلق على هذه الجسيمة المفترضة "سيليكترون" (Selectron) (مشتقة من تناظر فائق Supersymmetry وإلكترون Electron). وينطبق نفس الشيء على جسيمات المادة الأخرى، فمثلاً يسمى الشريك الفائق ذو السبين التخيلي المساوي للصفر للنيوترينو والكواركات، "سنيوترينو"، و"سيكواركات". وبالمثل، فإن الشريك الفائق لجسيمات القوى يجب أن يكون له قيمة حركة مغزلية "سبين" - $^1/_2$. ويسمى شريك الفوتونات "فوتينوس" وللغليونات "غلينوس" ولبوزونات W وZ" وينوس"Winos و"زينوس" Zinos.

وبالفحص الأدق، يبدو أن التناظر الفائق سمة غير اقتصادية بشكل مزعج؛ فهي تتطلب إضافة قائمة كاملة لينتهي الأمر بازدواج قائمة المكونات الأساسية. وحيث أنه لم يُكتشف أي شريك فائق حتى الآن أبداً، فإنه من المنطقي أن نستعير مقولة رابي الواردة في الفصل الأول في ما يتعلق باكتشاف الميون ونأخذها خطوة أبعد لنقول "لم يطلب أحد التناظر الفائق"، وباختصار نلفظ هذا المبدأ في التناظر. إلا أنه ولأسباب ثلاثة، فإن كثيراً من الفيزيائيين يعتقدون جازمين أن مثل هذا الرفض المطلق للتناظر الفائق قد يكون أمراً سابقاً لأوانه تماماً وسنناقش هذه الأسباب في ما يلي.

رابعاً: حالة التناظر الفائق: ما قبل نظرية الأوتار

أولاً من وجهة النظر الجمالية، فإن الفيزيائيين يجدون من الصعوبة أن يعتقدوا بأن الطبيعة قد تحترم معظم، وليس كل، التناظرات الممكنة رياضياً وطبعاً، من المحتمل أن يكون الاستخدام غير الكامل للتناظر هو ما يحدث فعلاً،

غير أن ذلك سيكون أمراً مشيناً وسيبدو الأمر وكأن باخ (الموسيقار الأشهر) قد ترك الحركة النهائية الفاصلة بعد أن طور العديد من الأصوات المتداخلة ليغطي نسقاً عبقرياً من التناظر الموسيقي.

ثانياً، وحتى في النموذج القياسي، وهي النظرية التي تهمل الجاذبية، فإن الأمور التقنية الشائكة والمتعلقة بالعمليات الكمية تُحلُّ بسهولة إذا أصبحت النظرية فائقة التناظر. والمشكلة الأساسية تكمن في أن أنواع الجسيمات المميزة تساهم بنصيبها في الجنون الكمي للعالم المجهري وقد اكتشف الفيزيائيون في خضم هذا الجنون عمليات معينة تتضمن تداخلاً للجسيمات يظل ثابتاً "فقط" إذا تم ضبط المؤشرات العددية في النموذج القياسي - لأقرب جزء في المليار من جزء في المليار - وذلك لتعادل معظم التأثيرات الكمية الضارة. ومثل هذه الدقة تناظر التحكم في ضبط زوايا إطلاق رصاصة من بندقية فائقة القوة لتصيب هدفاً معيناً على القمر بهامش خطأ لا يزيد عن سُمْك الأميبا. وعلى الرغم من أن الضبط العددي لمثل هذه الدقة يمكن أن يتم في النموذج القياسي، إلا أن الكثير من الفيزيائيين يتشككون كثيراً في وجود نظرية لها هذه البنية فائقة الحساسية بحيث تنهار إذا تغير أحد الأرقام التي تقوم عليها النظرية في حدود الخانة الخامسة عشرة بعد الفاصلة العشرية[5].

ويغير التناظر الفائق هذا الأمر بشكل جذري لأن البوزونات - جسيمات لها حركة مغزلية عدد صحيح (وقد سميت كذلك نسبة إلى الفيزيائي الهندي ساتيندرا بوز) - والفيرميونات - الجسيمات التي لها حركة مغزلية نصف عدد صحيح (فردي)، (وقد سُميت كذلك نسبة إلى عالم الفيزياء الإيطالي إنريكو فيرمي) - تميل إلى المساهمة بشكل كمي معادل. ومثل طرفي أرجوحة، وعندما يكون الهياج الكمي للبوزونات موجباً، فإنه يكون للفيرميونات سالباً أو العكس. وحيث

(5) وبالنسبة للقارئ المهتم بتفاصيل أكثر عن هذا الموضوع التقاني، فإننا نشير إلى الآتي: في الهامش رقم (6) في الفصل السادس أشرنا إلى ان النموذج القياسي يستشهد بـ "الجسيمة المسؤولة عن الكتلة" - بوزون هيغس - والتي تمنح الجسيمات في الجدولين رقمي رقمي (1-1) و(1-2) كتلتها التي نلاحظها. وحتى يتم هذا الأمر فإن جسيمة هيجس نفسها لا يمكن أن تكون أثقل من اللازم، وقد أظهرت الدراسات أن كتلتها لا بد أن تكون أقل من كتلة ما يقرب من ألف (1000) بروتون. غير أنه اتضح أن التأرجحات الكمية تميل للمساهمة بشدة في كتلة جسيمات هيغس مما يدفع بكتلتها لتصل إلى مقياس بلانك. وقد وجد العلماء النظريون، مع ذلك أن هذه النتيجة التي تكشف عن عيب رئيسي في النموذج القياسي، يمكن تجنبها إذا تم تدقيق بعض المؤشرات المعنية في النموذج القياسي (وبالأخص تلك المسماة الكتلة المجردة لجسيمات هيغس) حتى في 10^{15} جزء ليتلاشى تأثير التأرجحات الكمية على كتلة جسيمات هيغس.

أن التناظر الفائق يؤكد أن البوزونات والفيرميونات تجيء في ازدواج فإن التلاشي (التعادل) الأساسي يحدث منذ البداية - وهو التلاشي الذي يسبب الهدوء الملحوظ لبعض التأثيرات الكمية المجنونة. ويتضح أن ثبات التناظر الفائق للنموذج القياسي - النموذج القياسي المدعوم بكل الجسيمات المشاركة الفائقة - لا يعتمد بعد ذلك على الضبط العددي الهش غير المريح للنموذج القياسي العادي. ومع أن ذلك موضوع عالي التقنية فإن العديد من فيزيائيي الجسيمات يجدون أن هذه النتيجة تجعل التناظر الفائق أمراً جذاباً.

والأمر الثالث من الأدلة الظرفية على التناظر الفائق تأتي من مفهوم التوحد العظيم. وأحد السمات المحيرة لقوى الطبيعة الأربع هي المدى الهائل لشدتها الذاتية. فشدة القوى الكهرومغناطيسية تقل بمقدار 1٪ عن شدة القوى القوية، والقوى الضعيفة أقل من ذلك بعدة آلاف من المرات، وقوى الجاذبية هي الأقل بمقدار بضع مئات الأجزاء من المليون من جزء من المليار من جزء من المليار من جزء من المليار (10^{-35} مرة). وباتباع أبحاث غلاشو وعبد السلام ووينبرغ التي فتحت الطريق ووضعت أساس العلاقة الوطيدة بين الكهرومغناطيسية والقوى الضعيفة (المشروحة في الفصل الخامس) وأكسبتهم جائزة نوبل، اقترح غلاشو عام 1984 بمشاركة زميله من جامعة هارفارد هوارد جيورجي وجود علاقة ارتباط مشابهة مع القوى القوية. وأعمالهم التي افترضت "التوحد العظيم" لثلاث من القوى الأربع، تختلف في أمر واحد أساسي من النظرية الكهربية الضعيفة: بينما تبلورت وانفصلت القوى الكهرومغناطيسية والقوى الضعيفة من اتحاد أكثر تناظراً عندما انخفضت درجة حرارة الكون إلى حوالى مليون مليار درجة مطلقة فوق الصفر (10^{15} كلفن) ، بين جيورجي وغلاشو أن الاتحاد مع القوى القوية يظهر فقط عند درجة حرارة أعلى ببضع عشرات التريليونات من المرات - أي حوالى عشرة مليار مليار مليار درجة فوق الصفر المطلق (10^{28} كلفن). وبحسابات الطاقة فإن ذلك مساوٍ لحوالي مليون مليار مرة كتلة البروتون أو حوالي عشرة آلاف مرة أقل من كتلة بلانك. أخذ جيورجي وغلاشو الفيزياء النظرية بجرأة إلى دنيا من الطاقة تفوق ما تجرأ على اختباره أي إنسان من قبل بمقدار هائل جداً.

وقد جعلت أبحاث جيورجي وهيلين كوين ووينبرغ التالية، في جامعة هارفارد عام 1974، من الوحدة الممكنة للقوى غير الجاذبية في إطار التوحد الأعظم أمراً أكثر وضوحاً وحيث أن مساهمتهم قد استمرت تلعب دوراً هاماً في توحيد القوى وفي تقويم مواءمة التناظر الفائق للعالم الطبيعي، فإن الأمر يستدعي أن نتوقف برهة لشرحه.

كلنا نعلم أن التجاذب الكهربي بين جسيمتين مضادتين في الشحنة أو شد قوى الجاذبية بين جسمين لهما كتلة يزداد شدة كلما قلت المسافة بينهما. وهذه من السمات البسيطة والمعروفة تماماً في الفيزياء الكلاسيكية. ومع ذلك، فإن هناك مفاجأة عندما نتطرق لدراسة فيزياء الكم على شدة هذه القوى. لماذا لا بد أن يكون لميكانيكا الكم أي تأثير على الإطلاق؟ وتكمن الإجابة مرة أخرى في التأرجحات الكمية. فعندما نختبر مجال القوى الكهربية لأحد الإلكترونات مثلاً، فإننا في الواقع نختبر "الضباب الرقيق" الناتج من نشوء وتلاشي الجسيمة - الجسيمة المضادة، وبذا يتناقص تأثير هذا الضباب. ويعني ذلك أن شدة المجال الكهربي للإلكترون ستزداد كلما اقتربنا منه.

ويميز الفيزيائيون بين هذه الزيادة الكمية في الشدة كلما اقتربنا من الإلكترون وبين ما هو معروف في الفيزياء الكلاسيكية بقولهم أن الشدة "الذاتية" للقوى الكهرومغناطيسية تزداد كلما قصرت المسافة. ويعكس ذلك ما مفاده أن الشدة تزداد لا لمجرد اقترابنا من الإلكترون، بل لأن المجال الكهربي الذاتي للإلكترون يصبح أكثر فعالية. وفي الواقع، مع أننا قد ركزنا حديثنا عن الإلكترون إلا أن هذه المناقشات تنطبق بنفس المقدار على الجسيمات الأخرى المشحونة كهربياً، وهو ما يمكن إيجازه بقولنا إن المؤثرات الكمية تدفع شدة القوى الكهرومغناطيسية نحو الزيادة عند اختبارها على مسافات أقصر.

وماذا عن القوى الأخرى في النموذج القياسي؟ وكيف تتغير شدتها الذاتية مع المسافة؟ في العام 1973 قام كل من غروس وفرانك ويلتسيك من جامعة برينستون، ودافيد بوليتس من جامعة هارفارد، كل على حدة، بدراسة هذه التساؤلات، وتوصلوا إلى نتيجة مذهلة: تضخم السحابة الكمية لنشوء وتلاشي الجسيمة من شدة القوى القوية والقوى الضعيفة. ويعني ذلك أنه لو اختبرنا هذه القوى على مسافات أقصر فإننا نخترق أكثر وأكثر هذه السحابة المضطربة وبالتالي سنتعرض للنقص في التضخم الناتج من تأثيرها. وبذا فإن شدة هذه القوى تصبح أقل فأقل عند اختبارها على مسافات أقصر.

تلقف جيورجي وكوين ووينبرغ هذه النتيجة وتوصلوا إلى نهاية جديرة بالانتباه. وقد بينوا أنه عند احتساب تأثيرات الجنون الكمي هذه بعناية، فإن المحصلة هي أن شدة كل القوى الثلاث الجاذبية تتجمع معاً وبينما تختلف شدة هذه القوى بشكل كبير بالمقاييس التقنية المتاحة حالياً، فإن جيورجي وكوين ووينبرغ يدفعون بأن هذا الاختلاف هو في الواقع نتيجة للتأثير المختلف الذي يحدثه غيم النشاط الكمي المجهري في كل من هذه القوى. وقد أظهرت

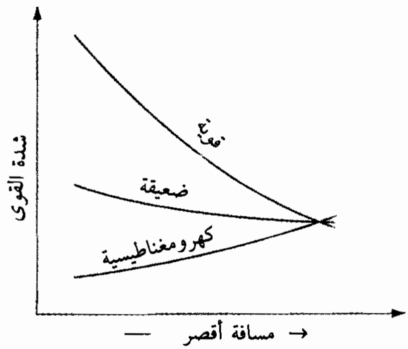
حساباتهم أنه لو اخترقنا هذا الغيم بأن نختبر تلك القوى على مسافات ليست من المقاييس العادية ولكنها تصل إلى حوالى جزء من المائة من جزء من المليار من جزء من المليار من جزء من المليار من السنتيمتر (10^{-29}) (وهو مجرد عشرة آلاف مرة أكبر من طول بلانك)، فإن شدة تلك القوى غير الجاذبية الثلاث تبدو متساوية.

وبعيداً عن عالمنا المألوف، كانت هذه الطاقة الهائلة واللازمة للإحساس بمثل هذه المسافات الصغيرة مميزة للكون المبكر المضطرب والساخن عندما مر عليه جزء من الألف من جزء من التريليون من جزء من التريليون من جزء من التريليون (10^{-39}) من الثانية - عندما كانت درجة الحرارة في حدود 10^{28} كلفن كما أشرنا من قبل. وبنفس الطريقة إلى حد ما، التي تنصهر بها المكونات المختلفة - مثل قطع من فلز، أو خشب أو صخر أو معدن الخ - معاً لتصبح بلازما متجانسة ومنتظمة عند تسخينها إلى درجة حرارة عالية بما فيه الكفاية، فإن هذه الأبحاث النظرية تفترض أن القوى القوية والضعيفة والكهرومغناطيسية تمتزج جميعها في قوة عظمى واحدة عند مثل درجات الحرارة الهائلة تلك. وهذا مبين في الشكل التخطيطي رقم (7-1)[6].

ومع أننا لا نملك التقانة التي تمكننا من اختيار مثل هذه المسافات الضئيلة، أو لنصل إلى مثل هذه الدرجات من الحرارة الهائلة، إلا أنه منذ عام 1974 قام التجريبيون بتنقيح الشدة المقيسة للقوى الثلاث اللاجاذبية في الظروف العادية بصورة ملحوظة. وهذه البيانات - نقطة البداية لمنحنيات شدة القوى الثلاث في الشكل رقم (7-1) هي البيانات المداخلات للاستقراءات الكمية لكل من جيورجي وكوين ووينبرغ. وفي عام 1991 قام كل من أوجو أمالدي من CERN، وويم دي بوير وهيرمان فورستناو من جامعة كارلسرو بألمانيا بإعادة حساب استقراءات جيورجي وكوين ووينبرغ مستفيدين من تلك التنقيحات التجريبية وبينوا أمرين هامين. الأمر الأول، هو أنه تتطابق على الأغلب شدة هذه القوى اللاجاذبية

(6) تجدر ملاحظة نقطة دقيقة في ما يخص الشكل رقم (7-1)، وهي أن شدة القوة الضعيفة تقع بين شدة القوة القوية والقوى الكهرومغناطيسية، بينما كنا قد ذكرنا في السابق أن هذه القوة الضعيفة تقع أدنى من القوتين المذكورتين. ويكمن السبب في ذلك، كما هو مبين في الجدول رقم (1-2)، في أن الجسيمات المرسال للقوة الضعيفة كثيفة الكتلة بينما تلك الخاصة بالقوة القوية والكهرومغناطيسية لا كتلة لها. وقد وردت شدة القوة الضعيفة في الشكل رقم (7-1) في الواقع، (كما تم قياسها بواسطة ثابت الازدواج - وهي فكرة ستتعرض لها في الفصل 12)، غير أن جسيماتها المرسال كثيفة الكتلة عبارة عن ناقلات بطيئة كسول تؤدي إلى تناقص تأثيرها. وسنرى في الفصل 14 كيف تتواءم قوة الجاذبية داخل الشكل رقم (7-1).

الشكل رقم (7-1)

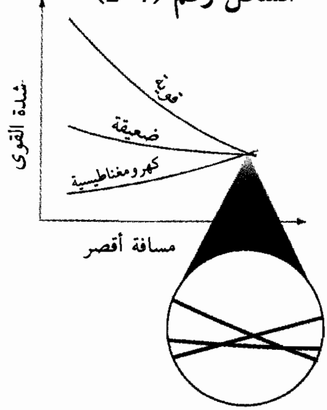


شدة القوى اللاجاذبية الثلاث أثناء عملها على مسافات أكثر قصراً - وهو ما يكافئ سلوكها في عمليات عالية الطاقة.

الثلاث لكن ليس تماماً عند المسافات متناهية الصغر (وكذلك الطاقة ودرجة الحرارة العاليتين) كما هو مبين في الشكل رقم (7-2).

الأمر الثاني، هو أنه يختفي هذا التعارض الضئيل الذي لا يمكن إنكاره في شدة هذه القوى إذا أدخلنا التناظر الفائق. والسبب في ذلك أن الجسيمات الشريكات الفائقين التي يتطلبها التناظر الفائقة، تساهم بتأرجحات كمية إضافية. وهذه التأرجحات كافية بالكاد لدفع شدة هذه القوى لتتجمع معاً.

الشكل رقم (7-2)



تنقيح حسابات شدة القوى تبين أنها تتلاقى على الأغلب بدون التناظر الفائق، ولكن ليس تماماً.

من الصعب جداً على كثير من الفيزيائيين أن يصدقوا أن الطبيعة قد تختار القوى بحيث يكون لها شدة تتحد على الأغلب ولكن ليس تماماً على المستوى المجهري - أي تصبح متساوية مجهرياً ويشبه الأمر وضع القطع في أحجية الصور المقطعة، عندما تكون القطعة الأخيرة غير متوافقة قليلاً ولا تدخل في المكان المخصص لها بالضبط. ويقوم التناظر الفائق بتنقيح نفسه بطريقة رائعة لتصبح كل القطع مناسبة لمكانها.

ومن ملامح الأمر الأخير أنه يزودنا بإجابة ممكنة عن السؤال، لماذا لم تكتشف بعد أي جسيمة مشاركة فائقة؟ أما الحسابات التي أدت إلى تجمع شدة القوى وأدت إلى اعتبارات أخرى درسها عدد من الفيزيائيين فإنها تشير إلى أن الجسيمات المشاركة الفائقة لا بد وأن تكون أثقل كثيراً من الجسيمات المعروفة. وعلى الرغم من أنه لا يمكن التوصل إلى تنبؤات محددة إلا أن الدراسات قد بينت أن الجسيمات المشاركة الفائقة قد تكون ذات كتلة أكبر آلاف المرات من كتلة البروتون إن لم تكن أثقل. وبما أن أحدث المعجلات لا تتمكن من التوصل لمثل هذه الطاقة الهائلة، فإن ذلك يعطي تفسيراً لعدم اكتشاف مثل هذه الجسيمات حتى الآن. وسنعود في الفصل التاسع إلى مناقشة التوقعات التجريبية لتحديد ما إذا كان التناظر الفائق هو خاصية من خواص عالمنا بالفعل، وذلك في المستقبل القريب.

طبعاً، لم تكن الأسباب التي قدمناها لنعتقد في صحة - أو حتى لا نرفض - التناظر الفائق، محكمة. وقد وصفنا كيف يرفع التناظر الفائق نظرياتنا إلى أكثر الأشكال تناظراً - إلا أنه يمكن القول بأن الكون غير مبالٍ بالتوصل إلى الشكل الأكثر تناظراً الممكن رياضياً. قد ذكرنا أن النقطة التقنية الهامة هي أن التناظر الفائق يعفينا من المهمة الشاقة لضبط المؤشرات العددية في النموذج القياسي لتجنب المعضلات الكمية - لكنك قد تدفع بأن النظرية الحقيقية لوصف الطبيعة قد تكون على حافة الصراط بين تأكيد الذات وتحطيم الذات. وقد ناقشنا كيف يعدل التناظر الفائق من الشدة الذاتية للقوى اللاجاذبية الثلاث عند المسافات الضئيلة بالطريقة التي تفي بالكاد لدمجها معاً في قوة عظمى موحدة - لكنك قد تدفع مرة أخرى أنه لا يوجد شيء في تصميم الطبيعة يفرض أن تتوافق تماماً شدة القوى هذه عند المقاييس المجهرية وفي النهاية يمكن أن تقترح أن التفسير الأبسط لعدم التوصل إلى اكتشاف الجسيمات المشاركة الفائقة هو أن كوننا ليس فائق التناظر، ولذلك، لا تتواجد الجسيمات المشاركة الفائقة.

ولا يستطيع أحد أن يفند هذه الاستجابات. لكن الأمر في حالة التناظر الفائق قد دُعِّمَ بشكل هائل عندما أخذنا في الاعتبار دوره في نظرية الأوتار.

خامساً: التناظر الفائق في نظرية الأوتار

تضمنت نظرية الأوتار الأصلية، والتي نتجت من أبحاث فينزيانو في أواخر الستينيات من القرن العشرين، كل التناظرات التي نوقشت في هذا الفصل، غير أنها لم تتضمن التناظر الفائق (الذي لم يكن قد تم اكتشافه بعد). كان يطلق على النظرية الأولى التي قامت على مفهوم الأوتار، اسم أكثر دقة هو نظرية الأوتار البوزونية (Bosonic String Theory). وتدل كلمة بوزونية على أن كل الأنساق الاهتزازية للوتر البوزوني لها حركة مغزلية ذات رقم صحيح - ولا توجد أنساق فيرميونية (Fermionic Patterns)، أي لا توجد أنساق ذات حركة مغزلية يختلف رقمها بمقدار $^1/_2$ عن عدد صحيح. ويؤدي هذا إلى مشكلتين.

الأولى، إذا كان لنظرية الأوتار أن تصف كل القوى وكل المادة، فإنها لا بد وبشكل ما من أن تتضمن أنساقاً اهتزازية فيرمونية، حيث أن كل جسيمات المادة المعروفة لها حركة مغزلية قيمتها 2/1 الثانية، والأكثر مدعاة للحيرة، هو التحقق من وجود نسق واحد للاهتزاز في نظرية الأوتار البوزونية له كتلة سالبة (وبدقة أكثر مربع الكتلة سالب) - ويسمى تاكيون (Tachyon). وقبل ظهور نظرية الأوتار، درس الفيزيائيون احتمال أن يحتوي عالمنا على جسيمات تاكيون بالإضافة إلى الجسيمات المألوفة التي لها جميعاً كتلة موجبة، غير أن مجهوداتهم قد أظهرت أنه من الصعب إن لم يكن مستحيلاً لنظرية مثل تلك أن تكون منطقية. وبالمثل، ففي إطار نظرية الأوتار البوزونية قام الفيزيائيون بتجربة كل أنواع الحركات العجيبة ليجعلوا من التنبؤ اللامعقول حول أنساق اهتزاز التاكيون أمراً معقولاً، لكنهم لم يتوصلوا لأية نتيجة. وقد أكدت هذه السمات بشكل متزايد أنه على الرغم من أن النظرية كانت جذابة إلا أن الأوتار البوزونية كانت تفتقد شيئاً أساسياً.

في العام 1971، قبل بيير راموند،من جامعة فلوريدا، التحدي لتنقيح نظرية الأوتار البوزونية حتى تحتوي أنساق الاهتزاز الفيرميونية. ومن خلال أبحاثه والنتائج التي تلت ذلك لشوارتز وأندريه نوفو بدأت في الظهور صورة جديدة لنظرية الأوتار. ولدهشة الكثيرين، فإن أنساق الاهتزاز البوزونية والفيرميونية في هذه النظرية الجديدة يبدو أنها تجيء في أزواج. فلكل نسق بوزوني هناك نسق فيرميوني والعكس صحيح. وبحلول عام 1977، وضعت بصيرة العلماء فيرديناندو غليوتسي من جامعة تورينو وشيرك ودافيد أوليف من المعهد الإمبرطوري هذا الترافق على الطريق الصحيح. تضمنت النظرية الجديدة للأوتار

التناظر الفائق والازدواج الملحوظ بين الأنساق الاهتزازية البوزونية والفيرميونية الذي عكس هذه الخاصية عالية التناظر. وهكذا ولدت نظرية الأوتار فائقة التناظر - أي نظرية الأوتار الفائقة. والأكثر من ذلك، فإن أبحاث غليوتسي وشيرك وأوليف قد جاءت بنتيجة أخرى محورية: فقد بينوا أن اهتزازات التاكيون المزعجة للأوتار البوزونية لا تضر بالأوتار الفائقة. وشيئاً فشيئاً بدأت تتجمع قطع أحجية الأوتار كل في مكانه.

غير أن التأثير الأولي الأكبر لأبحاث راموند وكذلك نوفو وشوارتز لم يكن في الواقع في مجال نظرية الأوتار. وبحلول عام 1983 تيقن الفيزيائيان جوليوس ويس وبرونو زومينو أن التناظر الفائق - التناظر الجديد الناتج من إعادة صياغة نظرية الأوتار - يمكن تطبيقه حتى على النظريات القائمة على الجسيمات النقاط. وسرعان ما قاما بخطوات هامة تجاه تضمين مفهوم التناظر الفائق في إطار نظرية المجال الكمي للجسيمات النقاط. ومنذ ذلك الوقت، أصبحت نظرية المجال الكمي الموضوع السائد في التيار الرئيسي لمجتمع علماء فيزياء الجسيمات - مع تزايد وجود نظرية الأوتار كموضوع علمي جانبي - وقد أثارت وجهات نظر ويس وزومينو كمًّا هائلاً من الأبحاث التي تلت ذلك حول ما أصبح يسمى "نظرية المجال الكمي فائق التناظر" (Supersymmetric Quantum Field Theory). وأصبح النموذج القياسي فائق التناظر الذي ناقشناه فى المقطع السابق واحداً من الإنجازات النظرية المرموقة في هذا السياق. ونحن نرى الآن، من خلال منعطفات التاريخ، أن نظرية الجسيمات النقاط تلك تدين بالكثير لنظرية الأوتار.

ومع إعادة بعث نظرية الأوتار الفائقة في منتصف ثمانينيات القرن العشرين، عاد للظهور التناظر الفائق في الهيئة التي ظهر بها في الأصل. وفي هذا الإطار، فإن التناظر الفائق يتخطى بمراحل ما كنا قد عرضناه في الجزء السابق. والوسيلة الوحيدة المعروفة لدمج النسبية العامة وميكانيكا الكم هي نظرية الأوتار. غير أن الصورة فائقة التناظر لنظرية الأوتار هي الوحيدة التي تتجنب مشكلة التاكيون غير المريحة، وهي التي لها أنساق اهتزاز فيرميونية مسؤولة عن جسيمات المادة التي تكون العالم من حولنا. ولذلك فإن التناظر الفائق يتفق تماماً مع فرض نظرية الأوتار لنظرية كمية للجاذبية، كما يتفق بنفس الدرجة مع زعمها العظيم من أنها توحد كل القوى وكل المادة. فإذا كانت نظرية الأوتار صحيحة، فإن الفيزيائيين يتوقعون أن التناظر الفائق صحيح أيضاً.

وعلى كل، وحتى منتصف تسعينيات القرن العشرين، كان هناك أمر واحد مزعج لنظرية الأوتار فائقة التناظر بشكل خاص.

سادساً: إحراج فائق ناجم عن الوفرة

إذا أخبرك أحدهم أنه قد توصل إلى حل لغز مصير أميليا إيرهارت(*) فإنك قد تتشكك في أول الأمر، لكن إذا وجدت لديه أدلة موثقة مع تفسيرات مقنعة، فإنك قد تصغي إليه، ومن يدري فقد تقتنع بذلك. لكن كيف سيبدو الأمر لو أنه بعد برهة قصيرة جاءك نفس الشخص بتفسير آخر، فإنك ستصغي صابراً، ولدهشتك قد تجد أن هذا التفسير البديل موثق هو الآخر ومدعم كما في الحالة الأولى. وبعد الانتهاء من هذا التفسير الثاني، سيقدم لك تفسيراً ثالثاً ثم رابعاً وحتى خامساً، كل منها مختلف عن الآخر لكنها جميعاً مقنعة بنفس الدرجة. وفي نهاية الأمر وبلا شك، فإنك لن تكون قد اقتربت من حل لغز أميليا إيرهارت أكثر مما كنت عليه في البداية. وفي مجال التفسيرات الأساسية، كلما زاد عددها قل تفسيرها بالتأكيد. وبحلول العام 1985، وعلى الرغم من الإثارة المستحقة التي أحدثتها نظرية الأوتار، إلا أنها بدت وكأنها الخبير المتحمس في حل موضوع إيرهارت. والسبب في ذلك أن الفيزيائيين قد أيقنوا، بحلول عام 1985، أن التناظر الفائق، وهو في هذا الوقت العامل المركزي في بنية نظرية الأوتار، يمكن تضمينه في نظرية الأوتار بخمس طرق مختلفة وليس بطريقة واحدة. وينتج من كل طريقة ازدواج للأنساق الاهتزازية البوزونية والفيرميونية، إلا أن تفاصيل هذا الازدواج والصفات العديدة الأخرى للنظريات الناتجة تختلف بشكل جذري. وبالرغم من أن أسماءها ليست ذات أهمية، إلا أنها تستحق الإشارة إليها. وتسمى هذه النظريات الخمس للأوتار الفائقة التناظر: نظرية الطراز الأول، ونظرية الطراز الثاني (أ)، ونظرية الطراز الثاني (ب)، ونظرية الطراز المغاير أوه (32)، ونظرية الطراز المغاير إي 8 × إي 8.

Type I Theory, Type II A Theory, Type II B Theory, The Heterotic Type O (32) Theory, and The Heteroteric Type E8xE8 Theory.

وكل سمات نظرية الأوتار التي ناقشناها حتى الآن صحيحة لكل نظرية من هذه النظريات، لكنها تختلف فقط في التفاصيل الأدق.

وقد أحدث وجود خمس صور لما هو مفترض أن يكون نظرية كل شيء T.O.E. - ومن المحتمل أن تكون النظرية الموحدة النهائية - إرباكاً كبيراً لمنظري

(*) أول سيدة عبرت المحيط في طائرة ميكانيكية في العام 1928، وفي العام 1937 حاولت أن تطير حول العالم بطائرتها، لكنها اختفت بالقرب من جزيرة هاولاند في المحيط الهادئ، ولم يعثر على أي أثر لها أو لطائرتها حتى الآن (المترجم والمراجع).

نظرية الأوتار. وكما هو الحال في موضوع أميليا إيرهارت، لا بد أن يكون هناك تفسير واحد صحيح فقط (بصرف النظر عن وجود مثل هذا الحل أم لا)، فإننا نتوقع نفس الشيء في ما يتعلق بالإدراك العميق والأساسي للكيفية التي يسير بها العالم؛ فنحن نعيش في عالم واحد، ولذا نتوقع تفسيراً واحداً.

ولحل هذه المعضلة، وبالرغم من وجود خمس نظريات مختلفة للأوتار الفائقة، فإن أربعاً منها لا بد أن تستبعد تجريبياً ببساطة، لتترك إطاراً تفسيرياً واحداً صحيحاً ومناسباً حتى لو كان هذا هو الحال، فإن السؤال الملح حول "لماذا وجدت النظريات الأخرى في أول الأمر؟"، ما زال يقلقنا. وبكلمات ويتن الساخرة: "إذا كانت هناك واحدة من النظريات الخمس هي التي تصف عالمنا، فمن يعيش في العوالم الأربعة الأخرى؟"[7]. ويحلم الفيزيائيون بأن يؤدي البحث عن الإجابة النهائية إلى استنتاج واحد فريد لا يقبل الطعن على الإطلاق. وبشكل مثالي - فإن النظرية النهائية - سواء كانت نظرية الأوتار أو أي شيء آخر - لا بد أن تكون هي السبيل لأنه ببساطة لا يوجد احتمال آخر. فإذا كنا سنكتشف أن هناك نظرية واحدة فقط تبدو منطقية وتتضمن العناصر الأساسية للنسبية وميكانيكا الكم، فإن الكثيرين قد يشعرون بأنهم قد توصلوا إلى الفهم العميق للكيفية التي يتصف بها العالم وباختصار، سيكون ذلك انتصار النظرية الموحدة[8].

وكما سنرى في الفصل الثاني عشر فقد أخذت الأبحاث الحديثة نظرية الأوتار الفائقة خطوة عملاقة لتقترب من اليوتوبيا الموحدة، وذلك بأن بينت بصورة واضحة أن النظريات الخمس المختلفة هي في الواقع خمس وسائل لوصف نفس النظرية. ولنظرية الأوتار الفائقة التفرد بالأصالة.

بدا أن الأمور تتخذ وضعها الطبيعي، لكن، وكما سنناقش في الفصل القادم، فإن التوحيد من خلال نظرية الأوتار يتطلب مرة أخرى الابتعاد عن الفكر التقليدي.

(7) Edward Witten, *Lecture at the Heinz Pagels Memorial Lecture Series* (Colorado: Aspen, 1997).

(8) من أجل نقاش أكثر عمقاً لهذه الأفكار وغيرها من نفس النوع، يرجى مراجعة: Steven Weinberg, *Dreams of a Final Theory* (New York: Pantheon Books, 1992).

الفصل الثامن

أبعاد أكثر مما تراه العين

قام آينشتاين بحل تناقضين علميين أساسيين من تناقضات المائة سنة الأخيرة من خلال النسبية الخاصة ثم العامة. وعلى الرغم من أن المشكلات الأصلية التي دفعته للقيام بأبحاثه لم تكن ضمن ما توصل إليه، إلا أن كلاً من هذه الحلول غيرت تماماً من مفهومنا عن المكان والزمان. وقد حلت نظرية الأوتار التناقض العلمي الأساسي الثالث من تناقضات القرن الماضي بطريقة تجعل حتى آينشتاين يؤخذ بها. وتتطلب هذه النظرية أن نعرض مفهومنا عن المكان والزمن إلى مزيد من المراجعة الراديكالية. وبهذا فإن نظرية الأوتار تهز بعنف أسس الفيزياء الحديثة، لدرجة أن عدد الأبعاد المسلم به عموماً للكون - وهو شيء أساسي لدرجة أنك قد تعتقد أنه غير قابل للمناقشة - قد انقلب عن قناعة بصورة دراماتيكية.

أولاً: وهم المألوف

تغذي الخبرة الحدس. لكنها تقوم بما هو أكثر من ذلك: فالخبرة تصنع الإطار الذي بداخله نحلل ونفسر ما نستقبله. وبلا شك فإنك مثلاً تتوقع من "طفل الغابة" الذي نشأ وسط الذئاب أن يفهم العالم من منظور يختلف كلية عن منظورك أنت. وإذا عقدنا مقارنة أقل حدة، كما في حالة أناس نشأوا في ظل تقاليد ثقافية جد مختلفة، فإنها ستساعدنا في فهم درجة اعتماد تفسيرنا للأمور على خبرتنا.

إلا أن هناك أشياء معينة نمارسها "جميعاً". وهي غالباً ما تكون المعتقدات والتوقعات التي تجيء من هذه الخبرات العالمية والتي من الصعب تعريفها، والأكثر صعوبة أن تواجهها. والمثال الآتي بسيط لكنه صارخ. إذا أنهيت قراءة هذا الكتاب ونهضت فإنك ستتحرك في ثلاثة اتجاهات مستقلة - أي من خلال ثلاثة أبعاداً فضائية مستقلة. وبالتأكيد، فإن أي مسار تسلكه - بصرف النظر عن وعورته - سيكون نتاج محصلة الحركة خلال ما نطلق عليه "البعد يمين - يسار" و"البعد أمام - خلف" و"البعد فوق - تحت". وكل خطوة تخطوها تعني أنك أمام ثلاثة اختيارات تحدد كيف تتحرك خلال هذه الأبعاد الثلاثة.

وفي عبارة مماثلة لما صادفناه في مناقشتنا للنسبية الخاصة، فإن كل موقع في الكون يمكن تحديده تماماً بثلاث مجموعات من البيانات: منسوبة إلى هذه الأبعاد الفضائية الثلاثة. وبلغة مألوفة، يمكن أن تحدد عنواناً في مدينة بأن تذكر الشارع (الموقع في البعد "يمين - يسار")، والشارع المتقاطع معه أو الجادة (الموقع في البعد "أمام - خلف")، ورقم الطابق (الموقع في البعد "فوق - تحت"). ومن منظور أكثر حداثة فقد رأينا أن أبحاث آينشتاين قد شجعتنا على أن نفكر في الزمن كبعد آخر (البعد "مستقبل - ماض")، مما يؤدي إلى أربعة أبعاد (ثلاثة منها مكانية وبعد واحد زمني). وتحدد الأحداث في الكون بذكر أين ومتى تحدث.

وصفة الكون هذه أساسية ومستقرة ومنتشرة لدرجة أنها تبدو غير قابلة للجدل. إلا أنه في العام 1919 قام رياضي بولندي غير معروف يدعى تيودور كالوزا من جامعة كوننغسبرغ بتحدي ما هو واضح مألوف بتهور، وذلك بأن اقترح أنه من الممكن ألا يكون للعالم في الواقع ثلاثة أبعاد مكانية فقط، وربما يكون العدد أكثر من ذلك في الواقع. والاقتراحات التي تبدو سخيفة في بعض الأحيان قد تكون سخيفة في الواقع. وفي بعض الأحيان تهز تلك الأمور الفيزياء من أساسها. ومع أن الأمر قد تطلب بعض الوقت لاستيعابه، فإن مقترحات كالوزا أحدثت ثورة في صياغتنا لقانون الفيزياء. وما زلنا نحس بتوابع الزلزال الذي أحدثته بصيرته النافذة.

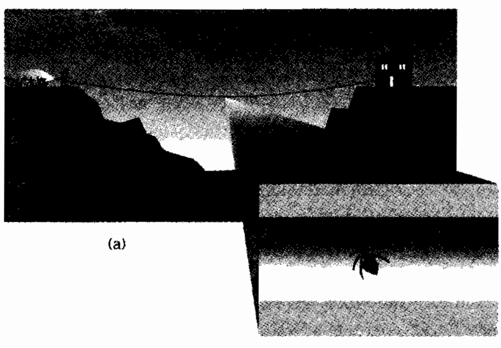
ثانياً: فكرة كالوزا وتنقيح كلاين

قد تبدو الاقتراحات بأن عالمنا يمكن أن يكون له أكثر من ثلاثة أبعاد فضائية أمراً سخيفاً وغريباً أو غامضاً. ومع ذلك، فهو في الواقع اقتراح متماسك ومعقول كلياً. وحتى ندرك ذلك، فمن السهل أن نحول أنظارنا مؤقتاً عن الكون ككل ونفكر في شيء أكثر ألفة مثل خرطوم مياه طويل ورفيع.

تخيل أن خرطوم مياه طوله بضع مئات من الأقدام يمتد عبر أخدود وأنت تشاهده من على بعد ربع ميل تقريباً كما في الشكل رقم (8-1)، (a). ومن هذه المسافة ستدرك طول الخرطوم الممتد أفقياً غير متعرج، ولكنك لن تتمكن من تمييز سُمْك الخرطوم إلا إذا كنت تملك قوة إبصار فائقة الحدة. ومن هذه المسافة، وإذا كانت هناك نملة تعيش فوق هذا الخرطوم، فهي لا تملك إلا بعداً واحداً فقط تسير فيه: البعد "يمين - يسار" على طول الخرطوم. فإذا سألك شخص ما أن تحدد مكان النملة في لحظة معينة فإنك ستحتاج فقط إلى مجموعة واحدة من البيانات: بعد النملة عن الطرف الأيسر (أو الأيمن) للخرطوم. وخلاصة الموضوع أن قطعة طويلة من خرطوم المياه تبدو من مسافة ربع ميل وكأنها ذات بعد واحد فقط.

وفي الحقيقة، فإننا نعلم أن للخرطوم سُمكاً وقد تجد صعوبة في تحديد ذلك من مسافة ربع ميل، ولكن باستخدام منظار مقرب يمكن أن تقرب جزءاً من الخرطوم وتلاحظ مقاسه مباشرة كما هو موضح في الشكل رقم (8-1)، (b). ومن هذا المنظور المكبر سترى أن النملة الصغيرة الموجودة على الخرطوم تملك في الواقع اتجاهين مستقلين يمكنها السير فيهما: على طول البعد "يمين - يسار" الممتد على طول الخرطوم المحدد مسبقاً، وطول البعد "مع وضد عقارب الساعة" حول الجزء الدائري من الخرطوم (محيط الخرطوم الدائري). والآن أنت تعلم أنه لتحديد موقع النملة الصغيرة في أية لحظة، لا بد من مجموعتين من البيانات: أين توجد النملة على طول الخرطوم، وأين توجد النملة على طول المحيط الدائري للخرطوم. ويعكس ذلك حقيقة أن سطح خرطوم المياه له بعدان اثنان[1].

الشكل رقم (8-1)



(a) خرطوم مياه ينظر إليه من مسافة بعيدة فيبدو كأنه جسم ذو بعد واحد (b) عند تكبيره، يظهر بعد ثان - بعد آخر في شكل دائرة تلتف حول الخرطوم - فتصبح مرئية.

(1) هذه فكرة بسيطة، لكن حيث أن عدم دقة اللغة الشائعة قد تؤدي أحيانا إلى ارتباك فإن هناك ملحوظتين تزيلان هذا الارتباك. الأولى هي أننا نفترض أن النملة مجبرة على أن تعيش على "سطح" خرطوم المياه. فإذا كان في مقدورها أن تنفذ إلى داخل الخرطوم - أي إذا تمكنت من اختراق المادة المطاطية للخرطوم - فسنحتاج إلى ثلاثة أعداد لتحديد موقعها، لأننا سنحتاج إلى تحديد عمق اختراقها للخرطوم. أما إذا كانت النملة تعيش فقط على سطح الخرطوم، فإن موقعها يتحدد فقط بعددين. ويؤدي بنا ذلك إلى الملحوظة الثانية. فحتى لو كانت النملة تعيش فقط على سطح الخرطوم فإنه يمكننا، إذا أردنا ذلك، أن نحدد موقعها بثلاثة أعداد: العددين العاديين يمين-يسار، وخلف- أمام، وفوق- تحت بما هو مألوف لنا من أبعاد الفضاء. لكن بمجرد معرفتنا بأن النملة تعيش فقط على سطح الخرطوم فإن العددين المشار إليهما في المتن يعطيان الحد الأدنى من البيانات التي تحدد الموقع المتفرد للنملة. وهذا ما نعنيه عندما نقول إن سطح الخرطوم ذو بعدين.

ومع ذلك فهناك فرق واضح بين هذين البعدين، فاتجاه طول الخرطوم يكون طويلاً وممتداً ومن السهل رؤيته. أما الاتجاه حول سمك الخرطوم فيكون قصيراً ومتجعداً ومن الصعب رؤيته. ولكي ندرك البعد الدائري، لا بد من اختبار الخرطوم بدقة أكبر بشكل ملحوظ.

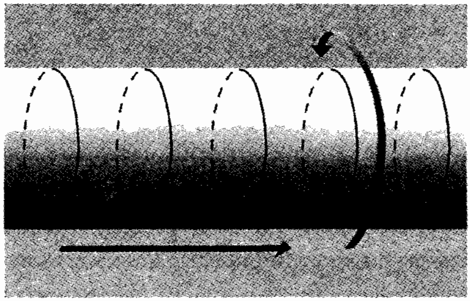
ويحدد هذا المثال سمة هامة ودقيقة للأبعاد الفضائية: فهي تظهر في نوعين. فهي يمكن أن تكون كبيرة وممتدة، وبذلك يمكن مشاهدتها مباشرة أو يمكن أن تكون صغيرة متجعدة وأصعب كثيراً في رؤيتها. ومن الطبيعي أنك لم تبذل جهداً كبيراً لاكتشاف البعد "المجعد" الملتف حول سُمك الخرطوم. وكل ما فعلته هو أنك استخدمت منظاراً مقرباً ومع ذلك، فإذا كنت تملك خرطوماً رقيقاً جداً - في رقة شعرة أو أنبوبة شعرية - فإن إدراك البعد المتجعد سيكون أكثر صعوبة.

وقد اقترح كالوزا شيئاً مذهلاً في بحث بعث به إلى آينشتاين في العام 1919. اقترح أن النسيج الفضائي للكون قد يكون له أكثر من الأبعاد الثلاثة الشائعة. كان الدافع وراء هذه الرسالة الراديكالية، كما سنشرح بعد قليل، هو تيقن كالوزا من أن ذلك يعطي إطاراً رائعاً وطاغياً لنسج النسبية العامة لآينشتاين ونظرية ماكسويل للكهرومغناطيسية معاً في إطار مفرد موحد للمفاهيم. ولكن، لنطرح السؤال الآتي في التو، كيف يتناسب هذا الاقتراح مع الحقيقة الظاهرية في أننا "نرى" بالضبط ثلاثة أبعاد فضائية ؟

والإجابة المتضمنة في أبحاث كالوزا والتي نقحها ووضحها الرياضي السويدي أوسكار كلاين عام 1926 هي أن النسيج الفضائي لعالمنا قد يكون له بعد ممتد وبعد متجعد. تماماً مثل خرطوم المياه الممتد أفقياً، فإن لعالمنا أبعاداً كبيرة وممتدة ومن السهل رؤيتها - الأبعاد الثلاثة المألوفة. لكن ومثل المقاس الدائري لخرطوم المياه، فإنه يمكن أن يكون للعالم أبعاداً إضافية فضائية تتجعد بإحكام في فراغ دقيق - فراغ من الدقة بحيث لم يكتشفه أحد حتى الآن بواسطة أكثر الأجهزة التجريبية تقدماً.

وحتى نستوضح الصورة أكثر لهذا الاقتراح الجدير بالملاحظة، لنتأمل مثال خرطوم المياه لبرهة. تخيل أن الخرطوم مطليٌّ بحلقات سوداء متقاربة على طول امتداده. ومن مسافة بعيدة يبدو الخرطوم وكأنه خط رفيع ذو بعد واحد. إلا أنك لو استخدمت منظاراً مقرباً لتقريب الصورة فستكتشف البعد المتجعد بسهولة أكثر بعد عملية طلائه وسترى الصورة الموضحة في الشكل رقم (8-2). ويؤكد هذا الشكل أن سطح الخرطوم ذو بعدين، أحدهما كبير ممتد والآخر صغير ودائري. اقترح

الشكل رقم (8-2)

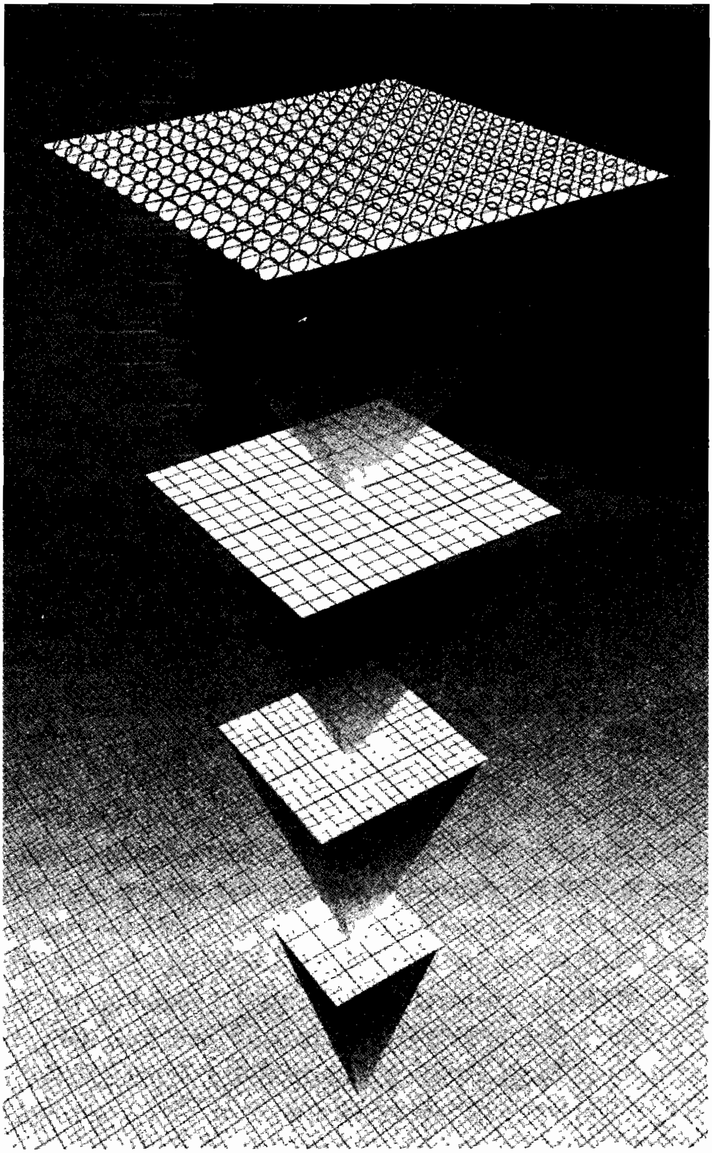


سطح خرطوم المياه ذو بعدين: أحدهما طويل وممتد (الممتد أفقياً) ويؤكده السهم المستقيم؛ والآخر قصير ومتجعد (دائري المقاس) ويؤكده السهم الدائري.

كالوزا وكلاين أن عالمنا الفضائي له نفس السلوك، إلا أن له ثلاثة أبعاداً فضائية كبيرة وممتدة، وبعداً واحداً صغيراً ودائرياً - والمجموع الكلي أربعة أبعاداً فضائية. من الصعب رسم أي شيء ذي أبعاد كثيرة، ولذا ومن أجل رؤية ذلك الأمر، سنكتفي بصورة تتضمن بعدين كبيرين وواحداً دائرياً صغيراً، وهو موضح في الشكل رقم (8-3)، حيث قمنا بتكبير النسيج الفضائي بنفس الطريقة التي كبرنا بها سطح خرطوم المياه.

وتبين الصورة السفلى في الشكل البنية الظاهرية للفضاء - العالم العادي من حولنا - على مقاييس المسافات المألوفة مثل الأمتار. وتتمثل هذه المسافات في أكبر مجموعة من خطوط الشبكة. وفي الصور المتتابعة بعد ذلك، فإننا نكبِّر النسيج الفضائي مركزين اهتمامنا على مناطق تزداد صغراً، نقوم بتكبيرها على التوالي لجعلها أسهل رؤية. وفي البداية، عندما نختبر النسيج الفضائي من مسافة أقصر، فلن نرى شيئاً، ويبدو أنه يحتفظ بنفس الصورة الأساسية كما يبدو من مسافة بعيدة، وهو ما نراه في تكبيرات المستويات الثلاثة الأولى. إلا أنه باستمرار زيادة التكبير في مستويات أعلى وفي اتجاه الفحص المجهري الأدق للفضاء - المستوى الرابع للتكبير في الشكل رقم (8-3) - يظهر بعدٌ جديد دائري متجعد، يشبه كثيراً حلقات دائرية من الخيط المكون لقطعة من السجاد محكمة النسج. اقترح كالوزا وكلاين وجود أبعاد دائرية إضافية عند كل نقطة في الأبعاد الممتدة، تماماً مثل وجود المقاس الدائري لخرطوم المياه عند كل نقطة على استقامة الخرطوم (ولتوضيح الرؤية فقد قمنا فقط برسم عينة مصورة للبعد الدائري عند نقاط فضائية منتظمة

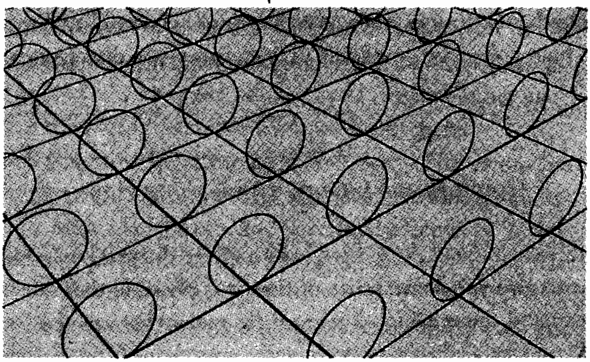
الشكل رقم (8-3)



كما في الشكل رقم (5-1)، فإن كل مستوى متتابع يمثل تكبيراً عظيماً للنسيج الفضائي من المستوى السابق له. وربما يكون لعالمنا أبعاداً أكثر - كما نرى في المستوى الرابع للتكبير - لم يتم التعرف المباشر عليها نظراً لتجعدها في الفضاء بحيث تبدو صغيرة جداً.

المسافات فيما بينها في الأبعاد الممتدة). ويبين الشكل رقم (8-4) صورة عن قرب للبنية المجهرية للنسيج الفضائي من وجهة نظر كالوزا وكلاين.

الشكل رقم (8-4)



تمثل شبكة الخطوط الأبعاد الممتدة الشائعة، فيما تمثل الدوائر الأبعاد الجديدة الدقيقة والمتجعدة. ومثل الحلقات الدائرية لخيط يكون قطعة من السجاد محكم النسج، فإن الدوائر توجد عند كل نقطة من الأبعاد المألوفة الممتدة - لكن لتوضيح الرؤية نرسمها عند تقاطعات الخطوط في الشبكة.

والتشابه مع خرطوم المياه واضح، إلا أن هناك بعض الاختلافات الهامة. فللكون ثلاثة أبعاد فضائية كبيرة وممتدة (وفي الواقع نرسم اثنين منها فقط)، مقارنة ببعد واحد للخرطوم، والأكثر أهمية أننا نصف النسيج الفضائي للعالم نفسه وليس مجرد جسم مثل الخرطوم الذي يتواجد ضمن هذا العالم. إلا أن الفكرة الأساسية واحدة: مثل المقاس الدائري للخرطوم، فإن البعد الدائري الإضافي المتجعد للكون صغير جداً، وأكثر صعوبة في التعرف عليه عند مقارنته بالبعد الممتد الكبير الواضح. وفي الحقيقة فإن حجمه من الصغر بحيث لا يمكن التعرف عليه حتى بأقوى أجهزة التكبير عندنا. ومن الأمور التي في غاية الأهمية، أن البعد الدائري ليس مجرد نتوءات دائرية داخل الأبعاد الممتدة المألوفة كما يمكن أن تخدع من الصورة. وبالأحرى فإن البعد الدائري بعد جديد، وهو البعد الموجود عند كل نقطة في الأبعاد الممتدة المألوفة، تماماً مثل كل من الأبعاد فوق - تحت، ويمين - يسار، وأمام - خلف الموجودة عند كل نقطة كذلك. وهو اتجاه جديد ومستقل يمكن أن تتحرك فيه النملة لو كانت صغيرة بما فيه الكفاية. ولتحديد الموقع الفراغي لمثل هذه النملة المجهرية فإننا قد نحتاج لمعرفة أين تقع

بالنسبة للأبعاد الثلاثة الممتدة المألوفة (التي تمثلها الشبكة) و"كذلك" أين موقعها على البعد الدائري. وعليه سنحتاج لأربع مجموعات من المعلومات الفضائية ، وإذا أضفنا الزمن، فسنحتاج إلى مجموع من خمس مجموعات من المعلومات عن الزمكان - أي مجموعة زائدة عما هو متوقع عادة.

وهكذا، وللغرابة، فإننا نرى أنه على الرغم من إدراكنا للأبعاد الثلاثة الفضائية الممتدة فقط، فإن تفسيرات كالوزا وكلاين توضح أن ذلك لا يمنع وجود أبعاد إضافية متجعدة، وخاصة إذا كانت متناهية الصغر. وهكذا فإن الكون يمكن أن يكون له أبعاد أكثر مما تراه العين.

كم هو صغير هذا "الصغير"؟ تستطيع أحدث الأجهزة أن تتعرف على بنى من الصغر مثل جزء من المليار من جزء من المليار من المتر. وطالما كان هذا البعد الإضافي متجعداً لحجم أقل من هذه المسافة الضئيلة، فإنه من الصغر بحيث لا نكتشفه. دمج كلاين عام 1928 اقتراح كالوزا الأصلي مع بعض الأفكار من مجال ميكانيكا الكم الذي بدأ يظهر. أشارت حساباته إلى أن هذا البعد الإضافي الدائري قد يكون في صغر طول بلانك، أي أقصر كثيراً مما هو متاح تجريبياً. ومنذ ذلك الحين يطلق الفيزيائيون على احتمال وجود أبعاد فضائية إضافية دقيقة اسم نظرية كالوزا وكلاين[2].

ثالثاً: الحركة جيئةً وذهاباً على خرطوم المياه

لقد عنينا بالمثال الملموس لخرطوم المياه والشكل رقم (8-3) أن نعطيك الإحساس بكيف يمكن أن يكون للعالم أبعاد فضائية إضافية. لكن حتى بالنسبة للباحثين في نفس المجال، فإنه من الصعب أن نتخيل عالماً له أكثر من ثلاثة أبعاد فضائية. ولهذا السبب، فإن الفيزيائيين قد شحذوا حدسهم حول هذه الأبعاد

(2) من المدهش أن الفيزيائيين سافاس ديموبولوس، ونيما أركاني-هاميد، وجيا دفالي قد أشاروا إلى أنه حتى لو كانت الأبعاد الإضافية المتجعدة من الطول بحيث تبلغ ميلليمتراً، فإنه من المحتمل أنها لم تكتشف حتى الآن، وذلك تأسيساً على أفكار دايجناتيوس أنطونياديس، وجوزيف لايكين. والسبب في ذلك هو أن معجلات الجسيمات تقوم باختبار العالم الميكروي بواسطة الاستفادة من القوة القوية والقوة الضعيفة والقوة الكهرومغناطيسية. أما قوة الجاذبية فهي تهمل عموماً لكونها واهنة جداً بمقياس الطاقة المتاح تقنياً. غير أن ديموبولوس ومعاونيه قد لاحظوا أنه إذا كان للبعد الإضافي المتجعد غلبة التأثير في قوة الجاذبية (شيء ما يتضح أنه مقبول في نظرية الأوتار) فإنه من المحتمل أن تكون جميع التجارب قد غفلت عنه. وستقوم تجارب جديدة، عالية الحساسية بالنسبة للجاذبية، بالبحث عن مثل تلك الأبعاد المتجعدة "الكبيرة" في المستقبل القريب. فإذا جاءت النتائج إيجابية كان ذلك بمثابة أعظم الاكتشافات في كل العصور.

الإضافية، وذلك بتأملهم في ما ستكون عليه الحياة لو عشنا في عالم خيالي له أبعاد أقل - متبعين طريق إدوين آبوت ومأخوذين بالعمل الكلاسيكي "فلاتلاند" (الأرض المسطحة Flatland)[3] - والتي ندرك فيها تدريجياً أن للعالم أبعاداً أكثر مما ندركه مباشرة. ولنجرب ذلك بأن نتخيل عالماً ذا بعدين اثنين مثل خرطوم المياه. ويتطلب ذلك أن نستغني عن المنظور "من الخارج" الذي يرى الخرطوم على أنه جسم في عالمنا. وبالأحرى، فإننا سنترك العالم المعروف لنا وندخل عالم الخرطوم الذي فيه مسطح الخرطوم الطويل جداً هو كل شيء على مدى امتداد الفضاء (يمكن تصوره على أنه طويل إلى ما لا نهاية). تخيل أنك نملة دقيقة تعيش على هذا السطح.

ولنبدأ بجعل الأمور أكثر تطرفاً. تخيل أن طول البعد الدائري لعالم الخرطوم قصير جداً - من القصر بحيث لا تدرك وجوده لا أنت ولا رفاقك المقيمون عليه. وبدلاً من ذلك فإنك وكل الآخرين الذين يعيشون في عالم الخرطوم ستعتقدون أن هناك حقيقة أساسية في الحياة في غاية الوضوح بحيث لا تقبل النقاش: لهذا العالم بعد فضائي "واحد". (فإذا ظهر في عالم الخرطوم ذلك نملة آينشتاين خاصة به، فإن من يعيشون على الخرطوم يمكن أن يقولوا بأن هذا العالم له بعد فضائي واحد وبعد زماني واحد). وفي الواقع، هذه الصفة واضحة بذاتها لدرجة أن المقيمين على الخرطوم أطلقوا على عالمهم "الأرض الخط"، مؤكدين بشكل مباشر أن له بعداً فضائياً واحداً.

تختلف الحياة في الأرض الخط كثيراً عن الحياة التي نعرفها. فمثلاً الجسم المألوف لك لا يمكن أن يُنَاسب الأرض الخط. ومهما بذلت من جهد في إعادة تشكيل الجسم، فإن هناك شيئاً لا يمكن تجنبه وهو أن لك بالتأكيد طولاً وعرضاً وسُمْكاً - التواجد الفضائي في ثلاثة أبعاد. وليس هناك مكان في عالم الأرض الخط لمثل هذا التركيب الباذخ. ولتتذكر أنه بالرغم من تصورك الذهني للأرض الخط التي ما زالت مرتبطة بجسم طويل مثل الخيط موجود في فضائنا، فإنك تحتاج فعلاً أن تفكر في الأرض الخط على أنها عالم - وهذا هو المطلوب. وككائن في الأرض الخط فإن عليك أن تتلاءم في امتدادها الفضائي. حاول أن تتخيل ذلك ولو حتى تخيلت أن لك جسم نملة، فإنك لن تتمكن من أن تتلاءم. فلا بد أن تعتصر جسمك الذي على شكل نملة ليصبح أشبه بالدودة، وأن تعتصره أكثر وأكثر ليصبح بلا سمك على الإطلاق. ولتتلاءم مع الأرض الخط، لا بد أن

(3) Edwin Abbot, *Flatland: A Romance of Many Dimensions* (Princeton, NJ: Princeton University Press, 1991).

تكون شيئاً له طول "فقط".

تخيل بعد ذلك أن لك عيناً عند كل طرف من جسمك. وعلى عكس العين البشرية التي يمكن أن تدور في محجرها لترى الأبعاد الثلاثة، فإن عينك مثبتة للأبد في موقعها، لأنك كائن خطي، وكل منها يحدق في بعد واحد. "وليس" ذلك قصوراً تشريحياً في جسمك الجديد. وبدلاً من ذلك، فإنك وجميع الكائنات الخطية الأخرى تقرون بأنه لأن للأرض الخط بعداً واحداً فقط، فليس هناك اتجاه آخر يمكن أن تنظر إليه عينك. فإلى الأمام وإلى الخلف هو كل امتداد الأرض الخط.

ويمكن أن نذهب أبعد من ذلك في تخيل الحياة على الأرض الخط، لكن سرعان ما سنتحقق أنه ليس هناك المزيد. فمثلاً، إذا وجد كائن خطي آخر على أحد جانبيك، فتصور كيف يبدو: فإنك سترى إحدى عينيه فقط - العين التي تواجهك - لكن على عكس العين البشرية فإن هذه العين ستظهر كنقطة مفردة. فليس للعيون في الأرض الخط أية سمات. ولا تبدي أية مشاعر - فلا مكان هناك لمثل هذه الخواص المألوفة. والأكثر من ذلك فإنك لن ترى سوى هذه الصورة شبه النقطة لعين جارك. فإذا أردت أن تعبرها وتكتشف دنيا الأرض الخط على الجانب الآخر لجسمها، فإنك ستصادف إحباطاً عظيماً فإنك لن "تتمكن من عبورها". لأنها "تغلق الطريق" تماماً، وليس هناك مكان على الأرض الخط لتدور حولها. فوضع الكائنات الخطية المنثورة على طول امتداد الأرض الخط ثابت لا يتغير. أي بؤس هذا.

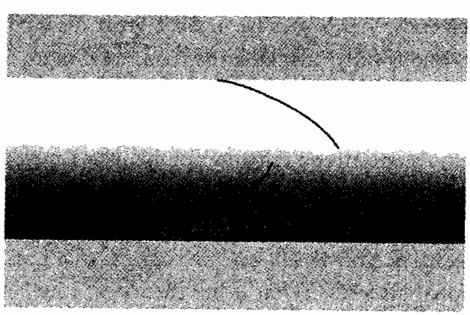
وبعد بضعة آلاف سنة من ظهور الدين في الأرض الخط، قدم أحد الكائنات الخطية، واسمه كالوزا ك. لاين، بعض الأمل للكائنات الخطية الملتصقة بالأرض. قد يكون وحياً إلهياً، أو نتيجة مجرد السأم من التحديق لسنوات في عين جارته، أن يقترح أن أرض الخط قد لا تكون ذات بعد واحد في نهاية المطاف. فماذا لو كان يفترض أن للأرض الخط في الواقع بعدين اثنين، بحيث يكون البعد الفضائي الثاني ذا اتجاه دائري وصغير جداً، ومن الصعب التعرف عليه مباشرة لأنه متناهي الصغر. يسترسل كلاين في رسم صورة للحياة الفسيحة الجديدة. فإذا أمكننا أن نفرد هذا الاتجاه الفضائي المتعرج قليلاً - الأمر الذي أصبح ممكناً فقط بناءً على الأبحاث الحديثة التي أجراها رفيقه لاينشتاين. يصف كالوزا ك. لاين عالماً يصيبك أنت ورفاقك بالدهشة ويغرس الأمل في الجميع - عالم يمكن أن تتحرك فيه الكائنات الخطية بحرية لتعبر بعضها بجوار البعض مستغلة البعد الثاني: حلت نهاية عالم العبودية الفضائي. ونحن ندرك أن كالوزا ك. لاين يصف الحياة في

عالم الخرطوم "ذي السُمك".

وفي الحقيقة إذا كان للبعد الدائري أن ينمو، نافخاً الأرض الخط لتصير مثل عالم الخرطوم، فإن حياتك ستتغير بشكل خطير. خذ جسدك مثلاً، ككائن خطي، فإن أي شيء يقع بين عيناك يشكل ما هو داخل جسمك. وتمثل عيناك بالنسبة لجسدك الخطي ما يمثله الجلد للجسد البشري العادي: فهي تمثل الحاجز بين ما هو داخل جسمك والعالم الخارجي. ولا يمكن للطبيب في الأرض الخط أن يصل إلى داخل جسمك الخطي إلا إذا ثقب سطحه - وبمعنى آخر، فإن الجراحة في الأرض الخط لا تتم إلا عن طريق الأعين.

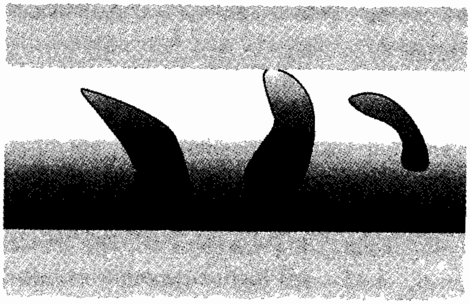
والآن تخيل ما يمكن أن يحدث إذا كان للأرض الخط، بناءً على كالوزا ك. لاين، بعد سري متجعد وإذا كان هذا البعد يتمدد لمسافة كبيرة ملحوظة. وهنا يمكن لكائن خطي أن يرى جسمك بزاوية، ولذا فإنه سيرى مباشرة ما بداخله كما هو موضح في الشكل رقم (8-5). وباستخدام هذا البعد الثاني، فإن الطبيب يمكن أن يجري العملية على ما بداخل جسمك مباشرة. أمرٌ غريب!!! فبمرور الزمن سينمو للكائنات الخطية بلا شك ما يشبه الجلد ليحمي ما بداخل الجسم المعرض للخارج - حديثاً - من التلامس مع العالم الخارجي. والأكثر من ذلك، فإنها ستنمو بلا شك إلى كائنات لها طول وعرض: وستنزلق الكائنات المسطحة (Flatbeeings) على طول عالم الخرطوم ذي البعدين كما هو موضح في الشكل رقم (8-6). فإذا نما البعد الدائري بشكل كبير، فإنه في الواقع سيصبح عالماً ذا بعدين مشابهاً إلى حد كبير الأرض المسطحة لآبوت - عالم خيالي ذو بعدين،

الشكل رقم (8-5)



يمكن لكائن خطي أن يرى مباشرة ما بداخل جسم آخر عندما تتمدد الأرض الخط وتتحول إلى عالم الخرطوم.

الشكل رقم (8-6)



كائنات مسطحة ذات بعدين تعيش في عالم خرطوم المياه.

ملأه آبوت بمحتوى ثقافي غني، بل وحتى وضعه في إطار محكم ساخر يقوم على الشكل الهندسي للفرد. وبينما من الصعب أن تتخيل أن يحدث أي شيء ذي قيمة في الأرض الخط - حيث لا يوجد مكان كافٍ لأي شيء - فإن الحياة على عالم الخرطوم ستصبح مفعمة بالاحتمالات. كان التطور من بعد فضائي واحد إلى بعدين مرئيين فضائيين كبيرين أمراً دراميّاً.

والآن لماذا نتوقف هناك؟ فقد يكون للعالم ذي البعدين نفسه بعد آخر متجعد، وبالتالي يصبح في السر ذا ثلاثة أبعاد. ويمكن تصوير ذلك كما في الشكل رقم (8-4) طالما أننا نقر بأننا نتصور أن هناك بعدين ممتدين (بينما عندما تحدثنا عن هذا الشكل في البداية كنا نتصور أن الشبكة المنبسطة تمثل الأبعاد الثلاثة الممتدة). وإذا كان لا بد للبعد الدائري أن يمتد، فإن الكائن ذا البعدين سيجد نفسه في عالم جديد فسيح، والحركة فيه ليست محدودة أو مقصورة على اليمين - يسار وأمام - خلف على طول الأبعاد الممتدة. فالآن يمكن أن يتحرك الكائن في بعد ثالث وهو الاتجاه "أعلى - أسفل" على طول الدائرة. وفي الواقع إذا كان البعد الدائري ينمو لدرجة كبيرة بما فيه الكفاية، فإن ذلك سيصبح عالمنا ذا الأبعاد الثلاثة. ونحن لا نعلم حتى الآن ما إذا كان أي بعد من الأبعاد الثلاثة الفضائية يمتد إلى الخارج إلى الأبد، أو أنه في الحقيقة يتجعد على نفسه على شكل دائرة عملاقة لا تتمكن من إدراكها أقوى التلسكوبات المتاحة. فإذا أصبح البعد الدائري في الشكل رقم (8-4) ضخماً بما فيه الكفاية - يمتد لمليارات السنين الضوئية - فإن الشكل سيعبر تماماً عن عالمنا.

لكن السؤال يعود من جديد: لماذا التوقف هناك؟ ويأخذنا ذلك إلى وجهة

نظر كالوزا وكلاين: إن عالمنا ذا الأبعاد الثلاثة قد يوجد به بعد فضائي رابع لم يتنبأ به أحد من قبل. فإذا كان هذا الاحتمال المدهش أو تعميمه على أبعاد متجعدة عديدة (سنناقشها قريباً) صحيحاً، وإذا كانت هذه الأبعاد المتجعدة هي نفسها تتمدد إلى حجم كبير، فإن الأمثلة ذات الأبعاد الأقل التي ناقشناها هنا توضح أن الحياة التي نعرفها قد تتغير تغيراً جذرياً.

ولكن للغرابة، حتى إذا ظلت هذه الأبعاد متجعدة وصغيرة دائماً، فإن وجود الأبعاد المتجعدة الإضافية له انعكاسات مدوية.

رابعاً: التوحد في الأبعاد الأعلى

وعلى الرغم من أن اقتراحات كالوزا في العام 1919 حول احتمال أن يكون للعالم أبعاد أكثر من تلك التي ندركها مباشرة، فإن شيئاً آخر قد فرض هذا الاحتمال الجديد بالملاحظة. صاغ آينشتاين النسبية العامة في الوضع المألوف لكون ذي ثلاثة أبعاد فضائية وبعد زماني آخر. ورغم ذلك، فإن الصيغة الرياضية لهذه النظرية يمكن أن تستخدم مباشرة لوضع معادلات مشابهة لعالم له أبعاد فضائية إضافية. وفي ظل هذا الافتراض البسيط بوجود بعد فضائي إضافي قام كالوزا بإجراء التحاليل الرياضية واستنبط بجلاء المعادلات الجديدة.

وقد وجد كالوزا أن صور المعادلات الخاصة بالأبعاد الثلاثة العادية هي في الأساس مطابقة لمعادلات آينشتاين. ولأن كالوزا قد ضمنها بعداً فضائياً إضافياً فلم يكن من الغريب أن يجد معادلات إضافية بجانب تلك التي استنبطها آينشتاين في الأصل. وبعد دراسة المعادلات الإضافية المرتبطة بالبعد الجديد، أدرك كالوزا أن هناك شيئاً مثيراً فلم تكن هذه المعادلات الإضافية سوى معادلات ماكسويل التي استنبطها سنة 1880 لوصف القوى الكهرومغناطيسية! وبإضافة بعد فضائي آخر يكون كالوزا قد وحد نظرية آينشتاين للجاذبية مع نظرية ماكسويل للضوء.

وقبل كالوزا كانت الجاذبية والكهرومغناطيسية تعتبران قوتين لا علاقة بينهما، ولم تكن هناك أدنى إشارة لوجود علاقة بينهما. وبوجود هذا الفكر الجريء الخلاق في تصور أن للعالم بعد فضائياً إضافياً، اقترح كالوزا أن هناك من المؤكد علاقة قوية بينهما. وتجادل نظريته بأن كلا من الجاذبية والكهرومغناطيسية مرتبطتان بتموجات نسيج الفضاء. وتحمل هذه التموجات الجاذبية في الفضاء العادي ذي الأبعاد الثلاثة، بينما تحمل التموجات - في البعد الجديد المتجعد - الكهرومغناطيسية.

أرسل كالوزا ببحثه إلى آينشتاين، الذي أثاره تماماً. وقد كتب آينشتاين في 21

نيسان/ إبريل 1919 إلى كالوزا ليخبره بأنه لم يتخيل في حياته أن التوحد بين النظريتين يمكن أن يتحقق "من خلال عالم أسطواني ذي خمسة أبعاد [أربعة فضائية وواحد زماني]"، ثم أضاف "لقد أعجبتني فكرتك بشدة لأول وهلة"[4]. إلا أنه كتب مرة أخرى بعد أسبوع وبشيء من التشكك هذه المرة: "لقد قرأت بحثك ووجدته مثيراً للاهتمام بالفعل، وحتى الآن فإنني لا أجد ما يمنع ذلك. ومن جهة أخرى، لا بد أن أعترف بأن الأدلة المطروحة لا تبدو مقنعة بما فيه الكفاية"[5]. غير أنه في 14 تشرين الأول/ أكتوبر 1921، وبعد مرور أكثر من عامين، كتب آينشتاين لكالوزا مرة أخرى، بعد أن مضى الوقت الكافي لهضم منطلقات كالوزا الجديدة غير المسبوقة هضماً تاماً: "ظهرت عندي أفكار أخرى حول عدم تشجيعك في نشر أفكارك عن التوحد بين الجاذبية والكهرباء منذ عامين... فإذا رغبت، فإنني على كل حال سأقدم بحثك للأكاديمية"[6]. وأخيراً، حصل كالوزا على رضى المعلم.

ومع أنها كانت فكرة جميلة، إلا أن الدراسات التفصيلية التي تبعت اقتراح كالوزا والمدعمة بمساهمات كلاين قد بينت أنها في تناقض خطير مع البيانات التجريبية. وقد تنبأت أبسط المحاولات لتضمين الإلكترون في النظرية بقيم لنسبة الكتلة إلى الشحنة مختلفة بشكل كبير عن القيم المقيسة. ولأنه لم يبد أن هناك في الأفق أي طريق واضحة للتغلب على هذه المشكلة فقدْ فقدَ الكثير من الفيزيائيين اهتمامهم بأفكار كالوزا بعد أن كانوا معنيين بها. إلا أن آينشتاين وآخرين ظلوا بين حين وآخر يداعبهم احتمال وجود هذا البعد الإضافي المتجعد، لكن سرعان ما أصبح ذلك من الاهتمامات غير الأساسية للفيزياء النظرية.

وفي الواقع كانت أفكار كالوزا سابقة لعصرها بكثير. اتسمت العشرينيات من القرن العشرين ببداية ازدهار للفيزياء النظرية والتجريبية المعنية بفهم القوانين الأساسية للعالم المجهري. أصبح النظريون منشغلين جداً عندما بدأوا في تطوير بنية ميكانيكا الكم ونظرية مجال الكم. وكان على التجريبيين أن يكتشفوا الخواص التفصيلية للذرة والعديد من مكوناتها الأولية. كانت النظرية تقود التجارب، في الوقت الذي كانت فيه التجارب تنقح النظرية، واندفع الفيزيائيون إلى الأمام على

(4) آينشتاين في خطابه لكالوزا، مأخوذ من كتاب: Abraham Pais, "*Subtle Is the Lord..*": *The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford: Oxford University Press, 1982), p. 330.

(5) آينشتاين في خطابه لكالوزا، مأخوذ من: Daniel Z. Freedman and Peter Van Nieuwenhuizen, "The Hidden Dimensions of Spacetime," *Scientific American*, vol. 252 (1985), p. 62.

(6) المصدر نفسه.

مدى نصف قرن ليصلوا في النهاية إلى النموذج القياسي. وليس غريباً أن تركت جانباً التخمينات حول الأبعاد الإضافية أثناء هذه الفترة الخصيبة والعنيفة. وفي الوقت الذي كان فيه الفيزيائيون يختبرون الطرق الكمية ذات القدرة العالية، والتي أدت تطبيقاتها إلى تنبؤات قابلة للتحقق تجريبياً، لم يكن هناك اهتمام كبير في الاحتمال المجرد أن يكون الكون مكاناً مختلفاً بشدة بمقاييس الأطوال متناهية الصغر للدرجة التي تعجز معها أعظم الأجهزة عن اختبارها.

لكن عاجلاً أو آجلاً، خبا هذا الازدهار. وفي الفترة من نهاية ستينيات وبداية سبعينيات القرن العشرين كانت البنية النظرية للنموذج القياسي قد اتخذت وضعها. ومع نهاية السبعينيات وبداية الثمانينيات من القرن العشرين تحقق الكثير من تنبؤاتها تجريبياً، وتوصل معظم فيزيائي الجسيمات إلى أن المسألة مجرد وقت قبل أن تتحقق باقي التنبؤات. غير أنه تبقى القليل من التفاصيل الهامة دون حل. وقد شعر الكثيرون أن الأسئلة الهامة المتعلقة بالقوى القوية والضعيفة والكهرومغناطيسية قد تمت الإجابة عليها.

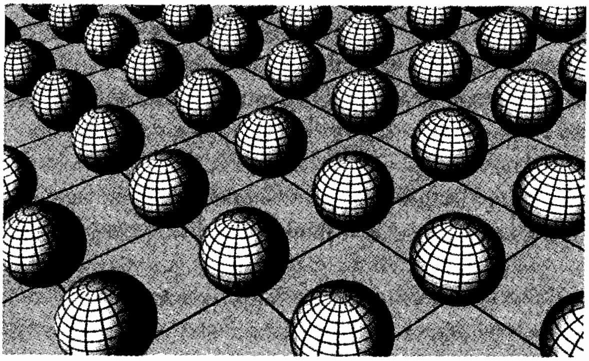
وفي النهاية أصبح الوقت مناسباً تماماً للعودة إلى التساؤل الأعظم على الإطلاق: التناقض المبهم بين النسبية العامة وميكانيكا الكم. وقد شجعت النجاحات التي تمت فيما يتعلق بصياغة نظرية كمية لقوى الطبيعة الثلاث الفيزيائيين أن يحاولوا احتواء القوة الرابعة، وهي الجاذبية. وبعد تتبع العديد من الأفكار التي كان مصيرها الفشل في النهاية، فإن مجتمع الفيزيائيين أصبح أكثر انفتاحاً تجاه الأفكار الراديكالية نسبياً وقد انتعشت من جديد نظرية كالوزا وكلاين بعد أن كانت قد تركت لتموت في أواخر عشرينيات القرن العشرين.

خامساً: نظرية كالوزا - كلاين الحديثة

تعمق فهمنا للفيزياء وتغير بشكل ملحوظ خلال العقود الستة التي مضت منذ اقتراح كالوزا الأصلي. فقد تمت صياغة ميكانيكا الكم تماماً والتحقق منها تجريبياً. واكتشفت القوى القوية والقوى الضعيفة التي لم تكن معروفة حتى عشرينيات القرن العشرين وأصبحت مفهومة بشكل كبير. وقد فسر بعض الفيزيائيين سقوط مقترحات كالوزا الأصلية بأنه لم يكن على دراية بهذه القوى الأخرى، وبذا فقد كان محافظاً بدرجة كبيرة في تجديده لمفهوم المكان. والقوى الأكثر تعني الحاجة إلى أبعاد أكثر. ولم يكن مجرد وجود بعد دائري منفرد كافياً، مع أنه كان قادراً على الإشارة إلى ارتباط ما بين النسبية العامة والكهرومغناطيسية.

وبحلول منتصف سبعينيات القرن العشرين، جرت جهود بحثية مكثفة تركزت

الشكل رقم (8-7)

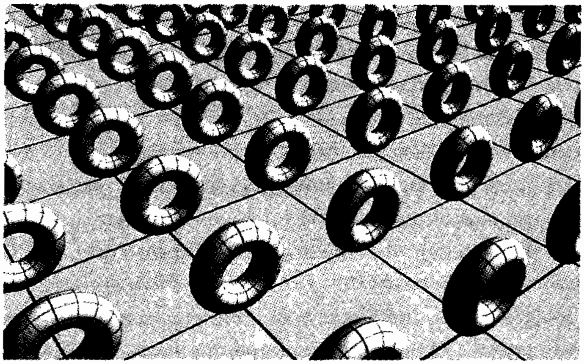


بعدان إضافيان متجعدان على شكل كعكة مجوفة.

حول نظريات على أبعاد أعلى بها اتجاهات فضائية متجعدة. ويصور الشكل رقم (8-7) مثالاً ذا بعدين إضافيين متجعدين على شكل سطح كروي - أي كرة. وكما في حالة البعد الدائري المنفرد، فإن هذه الأبعاد الإضافية مثبتة على "كل نقطة" على امتداد الأبعاد المألوفة. (ولوضوح الرؤية فقد قمنا مرة أخرى برسم عينة توضيحية وحيدة للأبعاد الكروية التي تبعد بعضها عن بعض بصورة منتظمة على شكل نقاط شبكة الأبعاد الممتدة). وعدا اقتراح وجود أعداد مختلفة من الأبعاد الإضافية، فإن المرء يمكن أن يتصور كذلك أشكالاً أخرى للأبعاد الإضافية. فعلى سبيل المثال، في الشكل رقم (8-8) صورنا احتمال وجود بعدين إضافيين آخرين، لكنهما في هذه المرة على شكل كعكة مجوفة. ومع أن ذلك يقع خارج إمكانيات رسمنا، إلا أن هناك احتمالات معقدة يمكن تصورها حيث توجد ثلاثة أو أربعة أو خمسة أبعاد أو أي عدد من الأبعاد الفضائية الإضافية التي تتجعد في عدد كبير من الأشكال الغريبة. ومرة أخرى، فإن الشروط الأساسية لوجود هذه الأبعاد أن يكون لها امتداد فضائي أصغر من أصغر الأطوال التي نستطيع اختبارها، حيث لم يتوفر اكتشافنا لأية تجارب تدل على وجودها.

كانت الاقتراحات حول أكثر الأبعاد العليا احتمالاً تتضمن كذلك التناظر الفائق. وكان الفيزيائيون يأملون أن يقوم التلاشي الجزيئي لمعظم التأرجحات الكمية العنيفة، التي نشأت من تزاوج الجسيمات فائقة المشاركة، بالمساعدة في تقليل العداء بين الجاذبية وميكانيكا الكم. وقد صكوا الاسم "الجاذبية الفائقة ذات الأبعاد الأعلى" (Higher-Dimensional Supergravity) لتعبر عن تلك النظريات التي تضم الجاذبية والأبعاد الإضافية والتناظر الفائق.

الشكل رقم (8-8)



تتجعد الأبعاد الإضافية على شكل "دونات" مجوفة أو محدبة.

وكما كان الحال في محاولات كالوزا الأصلية، ظهرت الصور المختلفة للجاذبية الفائقة ذات الأبعاد الأعلى وكأنها واعدة في البداية. وكانت المعادلات الجديدة الناتجة من الأبعاد الإضافية تذكاراً مدهشاً لتلك المعادلات التي استخدمت لوصف الكهرومغناطيسية والقوى القوية والضعيفة. لكن الفحص التفصيلي الدقيق قد بين أن الألغاز القديمة ما زالت قائمة. ومن الهام جداً أن التموجات المزعجة الكمية للفضاء في المسافات القصيرة قد تم تهذيبها بواسطة التناظر الفائق، لكن ليس بدرجة كافية لتوصلنا إلى نظرية معقولة. وقد وجد الفيزيائيون أيضا أنه من الصعوبة الحصول على نظرية واحدة معقولة ذات أبعاد أعلى تتضمن كل صفات القوى والمادة(7).

(7) اكتشف الفيزيائيون أن أكثر الصفات صعوبة في النموذج القياسي، ليتضمن صياغة ذات أبعاد أكثر، هي تلك المعروفة باسم الكفية (من كف اليد(*)) أو الكيرالية "Chirality". وحتى لا نثقل على القارئ بمناقشاتنا، فإننا لم نتعرض لهذه النقطة في الكتاب، أما بالنسبة للقراء المهتمين فإننا نقوم بذلك الآن باختصار. تخيل أن بعضهم قد عرض لك شريطاً سينمائياً لبعض تجارب علمية معينة، ثم وجه إليك تحدياً غير عادي وهو أن تحدد ما إذا كان الشريط الذي شاهدته قد سجل التجربة مباشرة أم أنه سجل صورتها في المرآة. ولكون المصور السينمائي ذا خبرة فإنه لا يوجد في الشريط أية دلائل تدل على وجود المرآة من عدمه. فهل تستطيع مواجهة هذا التحدي؟ في منتصف خمسينيات القرن العشرين بينت الأفكارالنظرية لكل من ت. د. لي، وس. ن. يانغ، وكذلك النتائج التجريبية لـ س. س واو ومعاونيه أن بالإمكان مواجهة هذا التحدي طالما أن الشريط قد تم تصويره. وبالتحديد أرست أبحاثهم قاعدة تنص على أن قوانين الكون ليست متماثلة تماماً مع صورتها في المرآة، بمعنى أن الصور المنعكسة في المرآة لبعض عمليات معينة - =

(*) جاءت التسمية من كون كف اليد اليمنى يمثل صورة مرآة من كف اليد اليسرى، وهما لا ينطبقان، وكلمة "كيرال" إغريقية وتعني الكف (المترجم والمراجع).

وبالتدريج بدأت تظهر على السطح بوضوح نظرية موحدة تجمعت قطعة قطعة، لكن لم يكن هناك العنصر المحوري القادر على ربط كل هذه القطع معاً في سلوك كمي ميكانيكي مستقر. وفي العام 1984 دخلت هذه القطعة المفقودة إلى الرواية - نظرية الأوتار - واحتلت صدارة المسرح.

سادساً: أبعاد أكثر ونظرية الأوتار

والآن لا بد من أن تكون قد اقتنعت بأن عالمنا "قد" يكون له أبعاد فضائية إضافية متجعدة، وقطعاً، حيث أنها متناهية الصغر، فلا شيء ينفي وجودها. لكنها قد تصدمك كونها كما لو كانت مصطنعة. وعُجزُنا عن اختبار المسافات الأقصر من جزء من المليار من جزء من المليار من المتر لا يسمح فقط بوجود أبعاد إضافية دقيقة ولكن يسمح كذلك بوجود كل أنواع السلوكيات المحتملة الدقيقة الأخرى - وربما يكون هناك حضارة ميكروسكوبية مأهولة بأناس خضر أصغر. وبينما يبدو أن الأبعاد الإضافية أكثر منطقية عن العالم المجهري المأهول، فإن افتراض وجود أي منها لم يختبر تجريبياً - وغير قابل للاختبار في الوقت الحالي - وعليه فإن احتمال وجود أي منهما واحد.

هكذا كان الحال حتى ظهور نظرية الأوتار. وهذه النظرية هي التي تحل المعضلة الرئيسية التي تواجه الفيزياء المعاصرة - وهي عدم التوافق بين ميكانيكا الكم والنسبية العامة - وهي التي توحد فهمنا لكل القوى والمكونات المادية الأساسية في الطبيعة. لكن للوصول إلى هذه الإنجازات اتضح أن نظرية الأوتار تتطلب أن يكون للكون أبعاد فضائية إضافية.

وهنا يكمن السبب. وأحد العناصر الرئيسية في ميكانيكا الكم هو أن مقدرتنا على التنبؤ محددة أساساً بمنطق تأكيد أن نتائج معينة تأتي من احتمالات معينة.

= تلك التي تعتمد بشكل مباشر على القوى الضعيفة - "لا يمكن أن تحدث في عالمنا"، حتى ولو كانت العملية الأصلية ممكنة الحدوث. وهكذا، إذا تابعت الشريط السينمائي (الفيلم)، ورأيت إحدى تلك العمليات المستحيلة تحدث، فإنك ستعلم أنك تشاهد صورة مرآة للتجربة وليس التجربة نفسها. وحيث أن المرايا تبادل ما هو يمين بيسار والعكس، فقد أوضحت أبحاث لي ويانغ وواو أن الكون ليس متناظراً تماماً فيما يخص يمين-يسار، أي بلغة التخصص فإن الكون كَفّيٌ "Chiral". إنها تلك الخاصية من خواص النموذج القياسي (القوة الضعيفة على وجه التحديد) التي وجد الفيزيائيون أنه من المستحيل تقريباً تضمينها في إطار الجاذبية الفائقة ذات الأبعاد الأكثر. وحتى نتجنب إرباك القارئ فإننا نشير إلى أننا سنناقش في الفصل العاشر مفهوماً في نظرية الأوتار يسمى "تناظر المرآة"، غير أن استخدام كلمة "مرآة" في هذا المضمون يختلف تماماً عن استخدامها هنا.

وبالرغم من أن آينشتاين قد شعر بأن هذا الأمر سمة غير مستحبة لمفهومنا الحديث، وقد تتفق مع آينشتاين على هذا الرأي، لكنه يبدو بالتأكيد كأنه حقيقي. ولنتقبل ذلك. ونحن جميعاً نعرف أن الاحتمالات هي دائماً أرقام تقع بين الصفر والواحد الصحيح - وبنفس الطريقة إذا عبرنا بالنسبة المئوية، فإن الاحتمالات تتراوح بين الصفر والمئة وقد وجد الفيزيائيون إشارة هامة إلى أن نظرية ميكانيكا الكم قد شطحت بعيداً، وذلك بحسابات معينة أدت إلى "احتمالات لا تقع" في المدى المقبول. فمثلاً كنا قد أشرنا مسبقاً إلى أن أحد دلائل عدم التوافق الشديد بين النسبية العامة وميكانيكا الكم - في إطار الجسيمة النقطة - هو أن الحسابات تؤدي إلى احتمالات لانهائية. وتعالج نظرية الأوتار هذه "اللانهائيات" كما ذكرنا من قبل. لكن، وهو ما لم نشر إليه من قبل، هناك مشكلة أكثر حرجاً ما زالت متبقية. ففي الأيام الأولى لنظرية الأوتار اكتشف الفيزيائيون بعض حسابات معينة تؤدي إلى احتماليات "سلبية"، وهي الأخرى خارج المدى المقبول. وبذا، ولأول وهلة، بدت نظرية الأوتار غارقة في المياه الساخنة لميكانيكا الكم.

بحث الفيزيائيون بإصرار عنيد، ووجدوا السبب في هذه السمة غير المقبولة. بدأ تفسير ذلك بملاحظة بسيطة: فإذا كان الوتر مثبتاً على سطح ذي بعدين - مثل سطح المنضدة أو خرطوم المياه - فإن عدد الاتجاهات المستقلة التي يمكن أن يتذبذب فيها تختزل إلى "اثنين" فقط: اتجاه يمين - يسار، واتجاه أمام - خلف على طول السطح. ويتضمن أي نسق اهتزازي موجود على السطح بعض التراكيب للاهتزازات في هذين الاتجاهين. وبالتالي فإننا نرى أن ذلك يعني أيضاً أن أي وتر في الأرض المنبسطة وفي عالم خرطوم المياه، أو في أي عالم ذي بعدين، هو الآخر مثبت ليتذبذب في بعدين فضائيين مستقلين فقط. فإذا قُدِّر للوتر أن يغادر السطح فإن عدد الاتجاهات المستقلة للاهتزاز سترتفع إلى ثلاثة، حيث سيتمكن الوتر من التذبذب في الاتجاه فوق - تحت. وبالمثل، ففي عالم ذي ثلاثة أبعاد فضائية فإن الوتر يمكن أن يتذبذب في ثلاثة اتجاهات مستقلة. وبالرغم من صعوبة التخيل، فإن النسق يستمر: في عالم له أبعاد فضائية أكثر وأكثر، فإن هناك المزيد والمزيد من الاتجاهات المستقلة التي يمكن أن يتذبذب بها الوتر.

وتأكيدنا على حقيقة اهتزازات الوتر تجيء من أن الفيزيائيين قد وجدوا أن الحسابات المعقدة كانت تتأثر كثيراً بعدد الاتجاهات المستقلة التي يتذبذب فيها الوتر. وقد نشأت الاحتمالات السلبية من الاختلاف بين ما تتطلبه النظرية وما يبدو أن الواقع يفرضه: بينت الحسابات أن الأوتار يمكن أن تتذبذب في تسعة اتجاهات فضائية مستقلة، وأن كل الاحتمالات السالبة ستتلاشى. حسناً، فإن هذا شيء رائع

نظرياً، لكن ماذا بعد؟ فإذا كانت نظرية الأوتار تصف عالمنا بأن له ثلاثة أبعاد فضائية، فإن ذلك يعني أننا ما زلنا في موقف محيِّر.

هل نحن حقاً في مثل هذا الموقف؟ وقد رأينا أن كالوزا وكلاين اللذين قادا المسيرة قد وجدا المنفذ. وبما أن الأوتار غاية في الدقة، فإنها لا تتذبذب فقط في الأبعاد الممتدة لكنها تستطيع أن تتذبذب في الأبعاد الدقيقة والمتجعدة أيضاً. وهكذا "يمكن" أن نجد الأبعاد الفضائية التسعة التي تتطلبها نظرية الأوتار في عالمنا، بافتراض - تبعاً لكالوزا وكلاين - أنه بالإضافة إلى الأبعاد الثلاثة الفضائية الممتدة المألوفة هناك ستة أبعاد فضائية أخرى متجعدة. وبهذه الطريقة فإن نظرية الأوتار، التي كانت تبدو وكأنها على حافة الاستبعاد من دنيا الفيزياء، قد أمكن إنقاذها. والأكثر من ذلك، وبدلاً من مجرد افتراض وجود الأبعاد الإضافية كما فعل كالوزا وكلاين ومن تبعهما، فإن نظرية الأوتار "تتطلب" وجود هذه الأبعاد بالضرورة. وحتى تصبح نظرية الأوتار معقولة فإن الكون لا بد من أن يكون له تسعة أبعاد فضائية وبعد زمني واحد، ليصبح المجموع عشرة أبعاد. وبهذه الطريقة يجد افتراض كالوزا للعام 1919 إجماعاً أكثر ما يكون إقناعاً وقوة.

سابعاً: بعض التساؤلات

ويثير ذلك عدداً من التساؤلات. الأول، لماذا تتطلب نظرية الأوتار عدداً محدداً يتكون من تسعة أبعاد لتتجنب القيم الاحتمالية غير المقبولة؟ وربما يكون هذا أصعب الأسئلة في نظرية الأوتار ولا يمكن الإجابة عنه بدون اللجوء إلى المعالجة الرياضية. وتكشف الحسابات المباشرة لنظرية الأوتار عن هذه الإجابة، لكن لا يملك أحد التفسير الحدسي غير التقني لكيفية ظهور العدد تسعة بالتحديد. وقد قال الفيزيائي إرنست رذرفورد يوماً ما أنه إذا لم تستطع تفسير نتيجة ما بمصطلحات بسيطة وغير تقنية، فإنك في الواقع لم تفهمها. لم يقل رذرفورد أن هذا يعني أن نتائجك خاطئة، بل كان بالأحرى يقول إنك لم تفهم أصولها أو معناها أو تطبيقاتها تماماً. قد يكون هذا صحيحاً بالنسبة لخاصية الأبعاد الإضافية في نظرية الأوتار. (في الحقيقة، لنستغل هذه الفرصة لنرتبط - بين أقواس - بالسمة المحورية لثورة الأوتار الفائقة الثانية التي سنناقشها في الفصل 12. وقد اتضح أن الحسابات التي أدت إلى وجود عشرة أبعاد زمكانية - تسعة فضائية وواحد زمني - كانت تقريبية. وفي منتصف تسعينيات القرن العشرين، قدم ويتن - معتمداً على وجهة نظره الخاصة به والأبحاث السابقة لكل من مايكل داف من جامعة A&M بتكساس، وكريس هول، وبول تاونسند من جامعة كمبريدج - دليلاً

مقنعاً على أن الحسابات التقريبية "تفتقد" بالفعل بُعداً فضائياً واحداً: دفع ويتن بأن نظرية الأوتار، لدهشة أغلب المشتغلين النظريين بها، تتطلب في الواقع عشرة أبعاد فضائية وبعداً زمنياً واحداً ليصبح المجموع "أحد عشر" بعداً وسندع جانباً هذه النتيجة الهامة حتى الفصل 12، حيث أنه ليس لها إلاَّ صلة ضعيفة بالمادة التي سنعرض لها قبل ذلك).

أما التساؤل الثاني، إذا كانت معادلات نظرية الأوتار (أو بدقة أكثر، المعادلات التقريبية التي تقود مناقشاتنا قبل أن نصل إلى الفصل 12) تظهر أن للكون تسعة أبعاد فضائية وبعداً زمنياً واحداً، فلماذا تكون ثلاثة أبعاد فضائية (وبعد زمني واحد) كبيرة وممتدة بينما كل الأبعاد الأخرى متناهية الصغر ومتجعدة؟ ولماذا لا تكون جميعاً ممتدة أو متجعدة أو أي احتمال آخر بين الحالتين؟ ولا يعرف أحد حتى الآن الإجابة عن هذا السؤال. وإذا كانت نظرية الأوتار صحيحة، فإننا حتمياً سنتمكن من استخلاص الإجابة، لكن حتى الآن ما زال فهمنا للنظرية غير تام للدرجة التي توصلنا إلى هذا الهدف. ولا يعني ذلك أنه لم تكن هناك محاولات جسورة لتفسير ذلك. فمثلاً، ومن منظور كسمولوجي (كوني)، يمكن أن نتصور أن كل الأبعاد كانت في البداية متجعدة بشدة، ثم، في لحظة الانفجار الهائل، انفردت وامتدت ثلاثة أبعاد فضائية وبعد واحد زماني حتى وصلت إلى مداها الحالي، بينما ظلت الأبعاد الفضائية الأخرى صغيرة كما هي. وقد قدمت الأدلة التقريبية الإجاب التساؤل لماذا نمت ثلاثة أبعاد فضائية بشكل كبير، كما سنناقش في الفصل 14، غير انه من الإنصاف أن نقول إن هذه التفسيرات ليست إلا في مراحلها الأولى. وفي ما سيتبع، فإننا سنفترض أن كل الأبعاد متجعدة ما عدا ثلاثة، الأمر الذي يتطابق مع ما نراه حولنا. ومن الأهداف الرئيسية للأبحاث الحديثة، التوصل إلى أن هذا الافتراض ينبثق من النظرية نفسها.

والتساؤل الثالث، بافتراض ضرورة وجود العديد من الأبعاد الإضافية، فهل من الممكن أن يكون بعضها أبعاداً زمانية إضافية، وليست أبعاداً فضائية إضافية؟ وإذا فكرت في ذلك للحظة، ستجد أن ذلك احتمال شاذ في الواقع. ولدينا جميعاً إدراك غريزي لما معناه أن يكون للعالم أبعاد فضائية متعددة، حيث أننا نعيش في عالم نتعامل فيه باستمرار مع ما مجموعه ثلاثة. لكن ما الذي يمكن أن يعنيه تعدد الأزمنة؟ وهل يمكن أن يتواءم أحد هذه الأزمنة مع الزمن كما نعرفه في الوقت الحالي نفسياً، فيما "يختلف" الآخر بشكل ما؟

سيصبح الأمر أكثر غرابة إذا فكرنا في وجود زمن متجعد. فمثلاً، إذا سارت نملة دقيقة حول بعد فضائي إضافي متجعد على شكل دائرة، فإنها ستجد نفسها

تعود إلى نفس المكان مرات ومرات لأنها تسير على شكل دوائر. ويحمل ذلك بعض الغموض لأننا نألف المقدرة على العودة باختيارنا إلى نفس الموقع في الفضاء كلما رغبنا في ذلك. إلا أنه لو كان البعد المتجعد بعداً زمانياً، فإن السير فيه يعني العودة، بعد انقضاء فترة زمنية، إلى لحظة سابقة من الزمن. وهذا بالطبع يقع خارج عالم خبرتنا. فالزمن كما نعرفه بعدٌ يمكن أن نقطعه في اتجاه واحد فقط بحتمية مطلقة، وغير قادرين إطلاقاً على العودة إلى لحظة مضت من الزمن. وطبعاً، قد يكون للأبعاد الزمانية المتجعدة صفات جد مختلفة عن المألوف، فقد يكون هناك بعد زماني فسيح نتخيل أنه يعيدنا إلى لحظة خلق العالم، ثم يتقدم ثانية إلى اللحظة الحالية. لكن وعلى عكس الأبعاد الفضائية، فإن الأبعاد الزمانية الجديدة وغير المعروفة مسبقاً قد تتطلب إعادة بناء حدسنا بشكل عظيم. استمر بعض النظريين في محاولة استكشاف إمكانية تضمين أبعاد زمانية إضافية في نظرية الأوتار، لكن لم يحسم الموقف بعد. وفي مناقشاتنا لنظرية الأوتار سنلتزم بالمنطلق الأكثر "تقليدية" والذي فيه كل الأبعاد المتجعدة أبعاد مكانية، غير أن الاحتمال المثير لوجود أبعاد زمانية جديدة يمكن أن يلعب دوراً في التطورات المستقبلية.

ثامناً: المستتبعات الفيزيائية للأبعاد الإضافية

بينت سنوات من الأبحاث، ترجع في بدايتها إلى بحث كالوزا الأصلي، أنه على الرغم من أن أي أبعاد إضافية يقترحها الفيزيائيون لا بد وأن تكون أصغر من أن "نراها" أو "تراها" أجهزتنا مباشرة (حيث أننا لم نرها)، إلا أن لها تأثيرات هامة غير مباشرة في الفيزياء التي نعرفها. وفي نظرية الأوتار، فإن هذا الارتباط بين الخواص المجهرية للفضاء والفيزياء التي نعرفها واضح بصفة خاصة.

وحتى تفهم ذلك، فإنك تحتاج إلى استرجاع أن كتلة وشحنة الجسيمات في نظرية الأوتار تتحدد بواسطة أنساق الاهتزازات الرنينية المحتملة للأوتار. تخيل وتراً دقيقاً أثناء تحركه وتذبذبه، وستتيقن من أن الأنساق الرنينية ستتأثر بما يحيطه من فضاء. فكر مثلاً في موجات المحيط. وعلى اتساع المحيط الهائل المفتوح، فإن أنساق الموجات المعزولة تكون حرة نسبياً لتتشكل وترتحل في أي طريق تشاء. ويشبه هذا كثيراً الأنساق الاهتزازية لوتر يتحرك خلال بعد فضائي كبير وممتد. وكما في الفصل 6، فإن وتراً مثل هذا يكون حراً أن يتذبذب في أي اتجاه ممتد آخر في أية لحظة. لكن إذا مرَّت موجات المحيط تلك خلال وسط فضائي أكثر ازدحاماً، فإن تفاصيل شكل الحركة الموجية ستتأثر بكل تأكيد، بعمق المياه مثلاً، وبمواقع وأشكال الصخور التي ستعترضها، وبالقنوات التي ستعبر المياه خلالها، وهكذا. أو

تخيل أنبوب الأرغن أو البوق الفرنسي. فالأصوات التي تحدثها كل من هاتين الآلتين نتيجة مباشرة للأنساق الرنينية لاهتزاز تيارات الهواء داخل هذه الآلات، وتتحدد هذه الأنساق بالحجم والشكل الدقيقين للفراغ المحيط داخل الآلة التي يمر خلالها التيار الهوائي. وللأبعاد الفضائية المتجعدة نفس الوقع على الأنساق الاهتزازية الممكنة للوتر. وحيث أن الأوتار الدقيقة تتذبذب خلال جميع الأبعاد الفضائية فإن الطريقة التي تلتف وتتجعد بها الأبعاد الإضافية حول بعضها البعض تؤثر بشدة وتحدد بدقة أنساق الاهتزاز الرنينية المحتملة. وتكوِّن هذه الأنساق، التي تتحدد إلى حد بعيد بهندسة الأبعاد الإضافية، مجموعة الخواص الممكنة للجسيمات التي نلاحظها في الأبعاد الممتدة المألوفة. ويعني ذلك أن "هندسة الأبعاد الإضافية" تحدد الصفات الفيزيائية والمميزة مثل كتلة الجسيمة وشحنتها التي نلاحظها في الأبعاد الثلاثة الفضائية الكبيرة العادية في حياتنا اليومية.

وهذه النقطة هامة وعميقة لدرجة أننا سنعيد ذكرها بكل مشاعرنا. وتبعاً لنظرية الأوتار فإن الكون مصنوع من أوتار دقيقة تكون فيه أنساق الاهتزاز الرنينية هي الأصل المجهري لكتلة الجسيمات وشحنات القوى. وتتطلب نظرية الأوتار كذلك أبعاداً فضائية إضافية لا بد أن تتجعد في أحجام جد صغيرة لتتطابق مع عدم رؤيتنا لها إطلاقاً لكن الوتر الدقيق يمكن أن يختبر الفضاء الدقيق. فعندما يتحرك الوتر وهو يتذبذب أثناء ذلك، فإن الشكل الهندسي للأبعاد الإضافية يلعب دوراً حرجاً في تحديد الأنساق الرنينية للاهتزاز. ولأن أنساق اهتزازات الوتر تظهر لنا على شكل كتلة وشحنة الجسيمات الأولية، فإننا نستنتج أن هذه الخواص الأساسية للكون تتحدد بالمقاييس الكبيرة بواسطة الحجم والشكل الهندسيين للأبعاد الإضافية. وهذه واحدة من أهم خواص نظرية الأوتار التي نتوقع لها تأثيراً بعيداً.

وحيث أن الأبعاد الإضافية تؤثر بشكل مدوٍّ في الخواص الفيزيائية الأساسية للكون، فإن علينا الآن - بحماس منقطع النظير - أن نبحث عن فهم للشكل الذي عليه هذه الأبعاد المتجعدة.

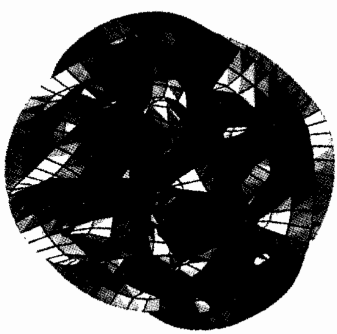
تاسعاً: كيف تبدو الأبعاد المتجعدة؟

لا يمكن للأبعاد الفضائية في نظرية الأوتار أن تتجعد بأي طريقة كانت، لأن المعادلات التي تنبثق من هذه النظرية تقيد بشدة الشكل الهندسي الذي تتخذه تلك الأبعاد. وفي العام 1984، بين كل من فيليب كانديلاس من جامعة تكساس بأوستين، وغاري هورويتس، وأندرو سترومنغر من جامعة كاليفورنيا في سانتا باربارا، وإدوارد ويتن، أن هناك فصيلاً معيناً من الأشكال الهندسية سداسية الأبعاد

يمكن أن يتفق مع هذه الشروط. وتعرف هذه الأشكال باسم فراغات كالابي - ياو (Calabi-Yau Spaces) أو (أشكال كالابي - ياو) على شرف اثنين من علماء الرياضة هما يوجينيو كالابي من جامعة بنسلفانيا، وشينغ ياو من جامعة هارفارد، اللذان لعبت أبحاثهما في هذا الموضوع - قبل ظهور نظرية الأوتار - دوراً محورياً في فهم هذه الفراغات. وعلى الرغم من أن الرياضيات التي تصف فراغات كالابي - ياو معقدة ودقيقة، إلا أننا يمكن أن نأخذ فكرة عن الكيفية التي تبدو عليها عن طريق إحدى الصور(8).

ونبين في الشكل رقم (8-9) مثالاً لأحد فراغات كالابي - ياو(9). ولا بد من أن تأخذ في اعتبارك عند النظر إلى هذه الصورة في الشكل أنها مقيدة بحدود، حيث أننا نحاول أن نمثل شكلاً سداسي الأبعاد على ورقة ثنائية الأبعاد، الأمر الذي يشكل صعوبات واضحة. غير أن الصورة تحمل فكرة تقريبية لما قد يبدو عليه فراغ كالابي - ياو(10).

الشكل رقم (8-9)



أحد الأمثلة لفراغ كالابي - ياو.

(8) بالنسبة للقارئ ذي الميول الرياضية نشير هنا إلى أن مخروط كالابي-ياو هو مخروط معقد من مخروطات كاهلر ذات النوع الأول من تشيرن Chern الذي يعاني الاختفاء. وقد ضمن كالابي عام 1957 أن كل مخروط من هذه المخروطات يسمح بنظام ريتسي Ricci - المسطح المتري، وقد برهن ياو على ذلك في العام 1977.

(9) هذا الشكل إهداء من أندرو هانسون من جامعة إنديانا، وقد صنع باستخدام Mathematica 3-D Graphing Package.

(10) بالنسبة للقارئ ذي الميول الرياضية نشير إلى أن هذا الشكل من أشكال كالابي-ياو (فراغ كالابي-ياو) هو قطاع حقيقي ثلاثي الأبعاد يمر خلال سطح خماسي مفرط في إسقاط لفضاء رباعي.

وما الصورة في الشكل رقم (8-9) إلا واحدة من عشرات آلاف الأمثلة لأشكال كالابي - ياو التي تتفق مع المتطلبات الصارمة للأبعاد الإضافية التي انبثقت عن نظرية الأوتار. ومع أن هذا الشكل ينتمي لعائلة من عشرات آلاف الأعضاء، وبذا فإنه لا يبدو كاستثناء، إلا أنه يجب مقارنته مع العدد اللانهائي من الأشكال الممكنة رياضياً وبهذا المقياس فإن فراغات كالابي - ياو تعتبر نادرة بالفعل.

وحتى تكتمل الصورة، علينا أن نتخيل الآن أننا نستبدل كل الكرات في الشكل رقم (8-7) - التي تمثل بعدين متجعدين - بفراغ كالابي - ياو. بمعنى أن نظرية الأوتار تزعم أنه عند كل نقطة على الأبعاد الثلاثة الممتدة والمألوفة، هناك ستة أبعاد لم ترد من قبل حتى الآن، وهي متجعدة بشدة في واحد من هذه الأشكال المعقدة كما هو مصور في الشكل رقم (8-10). وهذه الأبعاد متكاملة وتمثل جزءاً كليّ الوجود من النسيج الفضائي، فهي موجودة في كل مكان. فإذا حركت يدك على شكل قوس كبير، فإنك في الواقع لا تحركها خلال الأبعاد الثلاثة الممتدة فقط، بل خلال هذه الأبعاد المتجعدة كذلك. ومن الطبيعي، ولأن الأبعاد المتجعدة متناهية الصغر، أنك عندما تحرك يدك تطوف حولها عدداً هائلاً من المرات، مع العودة لنفس نقطة البداية كل مرة. ويعني مدى هذه الأبعاد المتجعدة الضئيل أنه لا يوجد حيّز للأجسام الكبيرة مثل يدك لتتحرك فيه - وينتهي الأمر بعد أن حركت يدك بأنك لم تدرك إطلاقاً ما حدث أثناء رحلتك خلال أبعاد كالابي - ياو المتجعدة.

الشكل رقم (8-10)



تبعاً لنظرية الأوتار، للكون أبعاد إضافية متجعدة في أحد أشكال كالابي - ياو.

وهذه سمة مذهلة لنظرية الأوتار. غير أنه إذا كنت عمليّ التفكير، فإن عليك أن ترجع بالمناقشة إلى الموضوع الأساسي المتماسك. والآن وبعد أن تكوَّن لدينا إدراك أفضل عن الشكل الذي قد تبدو عليه الأبعاد الإضافية، فإن السؤال الذي يطرح نفسه الآن هو ما هي الخواص الفيزيائية التي تنتج من الأوتار التي تتذبذب خلال هذه الأبعاد، وكيف يمكن مقارنة هذه الخواص بالمشاهدات التجريبية؟ وهذا هو تساؤل نظرية الأوتار الذي يساوي 64000 $.

الفصل التاسع

الأدلة الواضحة: بصمات التجارب

لا شيء يجلب السرور للعلماء النظريين لنظرية الأوتار أكثر من أن يقدموا بكل فخر إلى العالم قائمة تفصيلية بالتنبؤات التي تتحقق تجريبياً. وبالتأكيد، لا يمكن لأية نظرية تصف عالمنا أن تستقر قبل أن تتعرض تنبؤاتها إلى التحقق التجريبي. ومن دون النظر لمدى حبكة الصورة التي تقدمها نظرية الأوتار، فإنها إذا لم تصف عالمنا بدقة فلن تكون لها أية قيمة أكثر من لعبة محلية مثل لعبة البرج والتنين (Dungeons and Dragons).

يولع إدوارد ويتن بالإعلان أن نظرية الأوتار قد حققت وأكدت بشكل درامي وتجريبي تنبؤات مثل: "لنظرية الأوتار خاصية واضحة في التنبؤ بالجاذبية"[1]. وما كان يعنيه ويتن بذلك هو أن كلاً من نيوتن وآينشتاين قد طورا نظريتيهما عن الجاذبية لأن مشاهداتهما للعالم قد بينت لهما بوضوح أن الجاذبية موجودة، ولذا فقد تطلب الأمر تفسيراً دقيقاً ومتمشياً مع مشاهداتهما. وعلى العكس، فإن الفيزيائي الذي يدرس نظرية الأوتار- حتى لو لم يكن على دراية بالنسبية العامة بالمرة - سيتوصل للجاذبية بالتأكيد في إطار الأوتار. ومن خلال نسق اهتزاز الغرافيتون عديم الكتلة المغزلية - 2، فإن نظرية الأوتار تخيط الجاذبية في نسيجها النظري في كل مكان. وكما قال ويتن: "إن واحدة من أعظم الحقائق على الإطلاق هي أن الجاذبية تنبع من نظرية الأوتار[2]. واعترافاً بذلك فإن هذا "التنبؤ" يمكن وبدقة أكثر تسميته "ما بعد الحدث"، لأن الفيزيائيين قد اكتشفوا التوصيف النظري للجاذبية قبل أن يعرفوا نظرية الأوتار. وقد أشار ويتن لذلك بأنه مجرد صدفة تاريخية على كوكب الأرض. ويدفع ويتن بشيء خيالي بأنه في حضارات أخرى متقدمة في الكون، من المحتمل تماماً أن تكون نظرية الأوتار قد اكتشفت أولاً، وأن نظرية الجاذبية قد جاءت نتيجة مذهلة لذلك.

---

(1) Edward Witten, "Reflections on the Fate of Space-time," *Physics Today* (April 1996), p. 24.

(2) مقابلة مع إدوارد ويتن، 11 أيار/ مايو 1998.

وبما أننا مرتبطون بتاريخ العلوم على كوكبنا، فإن كثيرين يجدون أن "ما بعد الحدث" بالنسبة للجاذبية أمر غير مقنع تجريبياً لتأكيد نظرية الأوتار. وسيسعد معظم الفيزيائيين كثيراً بحدوث أحد أمرين: تنبؤ صادق لا خداع فيه من نظرية الأوتار يمكن للتجريبيين التأكد منه، أو تفسير "ما بعد الحدث" لخاصية ما للعالم (مثل كتلة الإلكترون أو وجود ثلاث عائلات للجسيمات) التي لا يوجد لها تفسير حتى الآن وسنناقش في هذا الفصل إلى أي مدى ذهب العلماء النظريون لنظرية الأوتار في اتجاه هذين الهدفين.

ومن السخرية كما سنرى، أنه بالرغم من أن لنظرية الأوتار المقدرة على أن تصبح أكثر النظريات التي درسها الفيزيائيون تنبؤاً - النظرية التي لها المقدرة على شرح الخواص الأكثر أساسية للطبيعة - فإن الفيزيائيين لم يتمكنوا بعد من إجراء تنبؤات بالدقة الضرورية لمواجهة البيانات التجريبية. ومثل طفل تلقى هدية عيد الميلاد التي كان يحلم بها لكنه لم يستطع تشغيلها لأن بعض الصفحات قد فقدت من كتيب التشغيل، فإن فيزيائيي الوقت الحالي يمتلكون الكأس المقدسة(*) للعلوم الحديثة، لكنهم لم يتمكنوا من الكشف عن مقدرة النظرية الكاملة على التنبؤ، ولن يستطيعوا إلى أن ينجحوا في "كتابة" كتيب التشغيل كاملاً إلا أنه، كما سنناقش في هذا الفصل، وبشيء من التوفيق، فإن إحدى السمات الرئيسية لنظرية الأوتار يمكن أن تحظى بتأكيد تجريبي خلال العقد القادم. وبقدر أكبر من التوفيق، فإن بصمات غير مباشرة للنظرية يمكن أن تتأكد في أية لحظة.

أولاً: إطلاق النار من أمكنة مختلفة

هل نظرية الأوتار صحيحة؟ نحن لا نعرف. فإذا كنت من أنصار عدم تقسيم قوانين الفيزياء بين تلك التي تحكم العالم الكبير وتلك التي تحكم العالم الصغير، وإذا كنت كذلك تعتقد أننا يجب ألا نستكين حتى نصل إلى نظرية مدى تطبيقاتها لانهائي غير محدود، فإن نظرية الأوتار هي الوحيدة الموجودة على الساحة. وقد تجادل بأن ذلك يلقي الضوء فقط على قصور الفيزيائيين في التخيل أكثر من بعض التفردات الأساسية لنظرية الأوتار. ربما يكون ذلك صحيحاً. وقد تجادل أكثر مثل رجل يبحث عن مفاتيحه المفقودة تحت ضوء الشارع فقط، فالفيزيائيون يحتشدون

(*) الكأس المقدسة التي شرب منها المسيح - عليه السلام - في العشاء المقدس، والتي أخذ المسيحيون فيما بعد يبحثون عنها بكل عزم (المترجم والمراجع).

حول نظرية الأوتار لمجرد أن أهواء التاريخ العلمي قد ألقت شعاعاً عشوائياً واحداً من نفاذ البصيرة في هذا الاتجاه. ربما. فإذا كنت إما محافظاً نسبياً أو مغرماً بمجرد المعارضة فقد تذكر أن الفيزيائيين لا يجب أن يضيعوا الوقت على نظرية تفترض صفة جديدة للطبيعة تقل بضع مئات ملايين المليارات من المرات عن أصغر شيء يمكن اختباره تجريبياً.

وإذا كنت قد تفوهت بهذه الاعتراضات في ثمانينيات القرن العشرين، عندما كانت نظرية الأوتار تسطع لأول مرة، فإن بعض أكثر الفيزيائيين احتراماً في ذلك الوقت كانوا سينضمون إليك. فمثلاً في منتصف ثمانينيات القرن العشرين قام الفيزيائي شيلدون غلاشو من جامعة هارفارد والحاصل على جائزة نوبل ومعه الفيزيائي بول جينزبارغ، الذي كان وقتها في جامعة هارفارد، قاما بالاستخفاف علناً بنظرية الأوتار لعجزها عن الخضوع للتجريب:

> بدلاً من المواجهة التقليدية بين النظرية والتجربة، فإن منظري نظرية الأوتار يلاحقون تناسقاً داخلياً، حيث تتحدد الحقيقة بالأناقة والتفرد والجمال. وتعتمد النظرية في وجودها على مصادفات سحرية وإلغاءات عجائبية وعلاقات بين حقول رياضيات تبدو لا علاقة في ما بينها (وربما تكون غير مكتشفة). فهل يمكن لهذه الخواص أن تكون سبباً يجعلنا نقبل نظرية الأوتار كواقع؟ وهل يمكن أن تحل الرياضيات والنواحي الجمالية محل التجربة المجردة وتتفوق عليها؟[3]

وقد قال غلاشو في مجال آخر:

> نظرية الأوتار الفائقة طموحة لدرجة أنها إما أن تكون صحيحة تماماً أو خاطئة تماماً. والمشكلة الوحيدة أن الرياضيات المستخدمة فيها جديدة وصعبة للدرجة التي لن نستطيع الحكم معها بصحة أي من الاحتمالين لفترة قد تصل إلى عدة عقود[4].

وقد وصل الأمر لدرجة أن غلاشو تساءل عما إذا كان "على أقسام الفيزياء أن تدفع مرتبات لمنظري نظرية الأوتار أو أن يسمح لهم بإفساد الطلاب سريعي

---

(3) Sheldon Glashow and Paul Ginsparg, "Desperately Seeking Superstrings?," *Physics Today,* (May 1986), p. 7.

(4) Sheldon Glashow, in: *The Super World I: Proceedings of the Twenty-Forth Course of the International School of Sub Nuclear Physics on the Super World, Held August 7-15, 1986, In Erice, Sicily, Italy,* The Sub Nuclear Series; 24, Edited by Antonio Zichichi (New York: Plenum, 1990), p. 250.

التأثر، محذراً بأن نظرية الأوتار ستنسف العلوم، تماماً مثلما فعلت الدراسات اللاهوتية أثناء العصور الوسطى.[5]

وقد أعلن ريتشارد فينمان بوضوح قبل وفاته بوقت وجيز أنه لا يعتقد أن نظرية الأوتار هي العلاج الفريد للمشاكل التي احتدمت بالتزاوج المتجانس بين الجاذبية وميكانيكا الكم - وبالذات تلك اللانهائيات الضارة:

> إنني أشعر - وقد أكون مخطئاً - أن هناك أكثر من طريقة لنزع جلد قط. ولا أعتقد أن هناك طريقة واحدة فقط للتخلص من اللانهائيات. وحقيقة أن نظرية ما تتخلص من اللانهائيات بالنسبة لي ليست سبباً كافياً للاعتقاد في تفردها[6].

كما كان هوارد جيورجي الزميل المتميز لغلاشو في جامعة هارفارد وأحد معاونيه، من أعلى الأصوات نقداً لنظرية الأوتار في أواخر ثمانينيات القرن العشرين، حيث قال:

> إذا سمحنا لأنفسنا بأن نُخدع بالقول الساحر عن التوحد "النهائي" على مسافات من الصغر بحيث يعجز أصدقاؤنا التجريبيون عن مساعدتنا، فإننا سنكون في موقف صعب، لأننا سنفقد العملية الهامة التي نهذب بها الأفكار غير المناسبة والتي تتميز بها الفيزياء من أنشطة بشرية أخرى عديدة وأقل إثارة[7].

وكما هو الحال بالنسبة لمواضيع كثيرة ذات أهمية كبيرة، فكما أن هناك من يقول لا، فإن هناك المؤيدين المتحمسين. فعندما علم ويتن كيف تضمنت نظرية الأوتار الجاذبية وميكانيكا الكم معاً، قال: "إنها أعظم إنجاز ذهني" في حياته[8]. وقد قال كومرون فافا وهو أحد الرواد المنظرين لنظرية الأوتار بجامعة هارفارد "إن نظرية الأوتار توضح بكل تأكيد أعمق المفاهيم عن الكون، كما لم نحظ بها من قبل"[9]. كما قال موراي جيل - مان الحائز جائزة نوبل إن نظرية الأوتار

(5) Sheldon Glashow and Ben Bova, *Interactions: A Journey through the Mind of a Particle Physicist and the Matter of this World* (New York: Warner Books, 1988), p. 335.

(6) Richard Feynman, in: Paul Davis and Julian Brown, eds., *Superstrings: A Theory of Everything?* (Cambridge MA: Cambridge University Press, 1988).

(7) Howard Georgi, in: Paul Davies, ed., *The New Physics* (Cambridge MA; NewYork: Cambridge University Press, 1989), p. 447.

(8) مقابلة مع إدوارد ويتن، 4 آذار/ مارس 1998.

(9) مقابلة مع كومرون فافا، 21 كانون الثاني/ يناير 1998.

"شيء عظيم" وإنه يتوقع أن تصبح إحدى صور نظرية الأوتار نظرية كل العالم[10].

وكما ترى، فإن الجدل حول كيفية عمل الفيزياء تغذيه الفيزياء جزئياً، والفلسفة المتميزة جزئياً. ويرغب "التقليديون" أن ترتبط الأبحاث النظرية بالمشاهدات التجريبية بشدة، وذلك في بوتقة البحوث الناجحة خلال القرون القليلة الماضية بشكل كبير. غير أن البعض الآخر يعتقد أننا مستعدون أن نتعامل مع بعض المشاكل التي تقع خارج مقدرتنا التقانية على اختبارها مباشرة.

وعلى الرغم من وجود الفلسفات المختلفة، فإن نقد نظرية الأوتار قد خبا خلال العقد الماضي. ويعزو غلاشو ذلك إلى أمرين: الأول، أنه قد لاحظ في منتصف ثمانينيات القرن العشرين ما يلي:

> كان منظرو نظرية الأوتار يزعمون بحماس وبتواتر أنهم سيجيبون عن كل أسئلة الفيزياء قريباً. ولأنهم قد أصبحوا أكثر حكمة في اندفاعهم وحماسهم، فإن الكثير من انتقاداتي خلال الثمانينيات قد أصبحت غير ذات موضوع[11].

والثاني، أنه قد أشار إلى ما يلي:

> لم نقدم نحن، منظري اللا أوتار، أي جديد على الإطلاق في العقد الأخير. ولذلك فإن القول بأن نظرية الأوتار هي الوحيدة في الساحة هو قول قوي وقادر. فهناك بعض الأسئلة التي لا يمكن الإجابة عنها في إطار نظرية المجال الكمي المألوفة. الأمر الذي أصبح واضحاً جداً. فربما يمكن الإجابة عن هذه الأسئلة بأمور أخرى، والأمر الآخر الذي أعرفه هو نظرية الأوتار[12].

ويعود جيورجي مرة ثانية إلى الثمانينيات، ليقول بنفس الشكل تقريباً:

> وفي أزمنة مختلفة من بداية تاريخها، تجملت نظرية الأوتار أكثر من اللازم. وقد وجدت أثناء سنوات الاعتراض أن بعض الأفكار في نظرية الأوتار قد أدت إلى طرق مثيرة في تفكيري حول الفيزياء، وكانت مفيدة في أبحاثي.

(10) موراي جيلمان، مقتبس من كتاب: Robert P. Crease and Charles C. Mann, *The Second Creation: Makers of the Revolution in Twentieth Century Physics* (New Brunswick, NJ: Rutgers University Press, 1996), p. 414.

(11) مقابلة مع شيلدون غلاشو، 28 كانون الأول/ ديسمبر 1997.

(12) المصدر نفسه.

وأنا أكثر سعادة الآن أن أرى الناس ينفقون وقتهم في دراسة نظرية الأوتار، حيث أنني أستطيع أن أرى كيف أن بعض الأمور المفيدة ستنتج من ذلك[13].

وقد أوجز العالم النظري دافيد غروس - أحد رواد فيزياء الأوتار والفيزياء التقليدية - الموقف ببراعة بالطريقة التالية:

اعتدنا أثناء تسلق جبل الطبيعة أن يكون التجريبيون في مقدمة الطريق. وكنا نحن النظريين الكسالى نتبعهم. وبين الحين والآخر كانوا يركلون حجراً تجريبياً يصطدم برؤوسنا. وكنا نفهم الفكرة في نهاية الأمر ونتخذ الطريق الذي مهده التجريبيون. وعندما نلحق بهم كنا نفسر لهم المنظر وكيفية وصولهم إليه. كان ذلك هو الطريق القديم السهل (على الأقل بالنسبة للنظريين) لتسلق الجبل. ونتوق جميعاً للعودة إلى تلك الأيام. لكننا نحن النظريين قد يتحتم علينا أن نقود الآن. وهذا أمر أكثر وحشة[14].

وليس لدى منظري نظرية الأوتار الرغبة في رحلة منفردة للوصول إلى قمة جبل الطبيعة؛ فهم يفضلون أكثر أن يشاركهم رفاقهم التجريبيون في هذا الحمل وتلك الإثارة. والأمر مجرد عدم توافق تقني في حالتنا الراهنة - اضطراب في التسلسل التاريخي - فأن يقوم النظريون بمد حبال وكابلات التسلق في آخر دفعة تجاه القمة قد أصبح على الأقل جزئياً من واقع الأمور، بينما لم يصل التجريبيون بعد. ولا يعني هذا أن نظرية الأوتار تنفصل في الأساس عن التجربة. والأحرى أن منظري الأوتار يعقدون آمالاً عظيمة في أن يركلوا لأسفل "حجراً نظريا" من طاقة فائقة من أعلى قمة الجبل إلى التجريبيين الذين يعملون في معسكر القاعدة

(13) مقابلة مع هوارد جيورجي في 28 كانون الأول/ ديسمبر 1997. وأثناء هذا الحوار لاحظ جيورجي أن التفنيد العملي (التجريبي) للتنبؤ بتحلل البروتون والذي انبثق أولاً من نظرية التوحد الكبرى التي صاغها هو وغلاشو (راجع الفصل السابع)، قد لعبت دوراً واضحاً في مقاومته لاعتناق نظرية الأوتار الفائقة. وقد أبدى بحدة ملاحظة حول أن نظريته "النظرية الموحدة الكبرى" قد طالت عالماً ذا طاقات أعلى كثيراً من أي نظرية أخرى سابقة، وعندما ثبت أن تنبؤاتها على خطأ - عندما أدى ذلك إلى إزاحته جانباً بشكل تلقائي - فإن اهتمامه تجاه دراسة فيزياء الطاقة العالية قد تغير بشكل فجائي. وعندما سألته ما إذا كان من الممكن أن يؤدي نجاح الإثبات التجريبي لنظريته الموحدة الكبرى، لو حدث ذلك، إلى أن يندفع ليصل إلى مقياس بلانك، فإنه أجاب "أجل، من المحتمل أن ذلك كان سيحدث".

(14) David Gross, "Superstrings and Unification," in: *Proceedings of the XXIV International Conference on High Energy Physics,* Munich, Fed. Rep. of Germany, August 4-10, 1988, Edited by R. Kotthaus and J. Kühn (Berlin; NewYork: Springer-Verlag, 1988), p. 329.

الأسفل. وهذا هدف أولي لأبحاثنا الراهنة حول نظرية الأوتار. وحتى الآن لم تلق أية أحجار متسارعة من القمة إلى أسفل، لكن كما سنناقش الآن، فإن بضع حصوات واعدة تفعل ذلك الآن بكل تأكيد.

ثانياً: الطريق إلى التجربة

لن نتمكن من التركيز على الأطوال الدقيقة الضرورية لرؤية الأوتار مباشرة من دون التوصل إلى تقنية هائلة تفتح الطريق لحل هذه المعضلة. ويستطيع الفيزيائيون أن يصلوا باختباراتهم حتى المقاييس الدنيا التي تبلغ جزءًا من المليار من جزء من المليار من المتر باستخدام مسرِّعات يبلغ حجمها تقريباً بضعة أميال. ويتطلب فحص مسافات أصغر طاقات أكبر، الأمر الذي يعني آلات أضخم لها القدرة على تركيز هذه الطاقة على جسيمة مفردة. وحيث أن طول بلانك يبلغ حوالي 10^{17} مرة أصغر من الأشياء التي نتعامل معها في حياتنا الآن، فإننا باستخدام التقنية المتاحة حالياً، سنحتاج إلى مسرِّعات حجمه مثل حجم المجرة لنتمكن من رؤية الأوتار المفردة. وفي الحقيقة، فإن شموييل نوسينوف من جامعة تل أبيب، قد بيّن أن هذه الحسابات التقريبية المبنية على المقاييس المباشرة ربما تكون أكثر تفاؤلاً من اللازم. فلقد أشارت دراساته الأكثر دقة إلى أننا قد نحتاج إلى مسرِّعات جل في حجم الكون كله. (الطاقة اللازمة لاختبار مادة عند طول بلانك تساوي تقريباً ألف كيلووات ساعة - أي متوسط الطاقة اللازمة لتشغيل جهاز تكييف الهواء لمدة مائة ساعة - وعليه فإن هذا ليس أمراً غريباً بالتحديد. لكن التحدي التقني الذي لا يقهر هو تركيز كل هذه الطاقة على جسيمة مفردة، أي على وتر مفرد (فإذا كان الكونغرس الأمريكي قد ألغى تمويل المصادم الفائق الذي يعمل بالموصلات الفائقة - مسرِّعات مسرِّع عجل محيطه مجرد 54 ميلاً فقط - فعليك أن تنسى أنه سيمول مسرِّعاً عجلاً للاختبار عند أطوال بلانك. وإذا كنا نرغب في اختبار نظرية الأوتار تجريبياً فلا بد من البحث عن طريقة غير مباشرة. وعلينا أن نحدد تطبيقات المستتبعات الفيزيائية لنظرية الأوتار التي يمكن مشاهدتها عند أطوال كثيراً من طول الأوتار نفسها[15].

وقد اتخذ كل من كانديلاس، وهورويتس، وسترومنغر، وويتن الخطوات

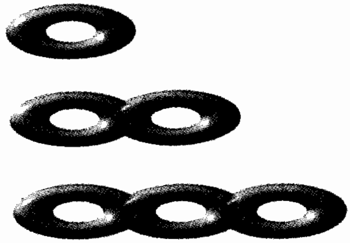
(15) إذا قلنا ذلك فإن الأمر يستحق أن نحتفظ في أذهاننا بالاحتمال الضئيل الذي أشرنا إليه في الهامش رقم (8)، الفصل السادس حول إمكانية أن تكون الأوتار أطول بشكل ملحوظ مما كان يعتقد في الأصل، وبالتالي يمكن أن تخضع للملاحظات التجريبية مباشرة بواسطة معجلات بعد بضعة عقود من السنين.

الأولى نحو هذا الهدف في بحثهم الذي أحدث دوياً هائلاً. وهم لم يكتشفوا فقط أن الأبعاد الإضافية في نظرية الأوتار لا بد من أن تتجعد في شكل كالابي - ياو، بل إنهم استخدموا بعض التضمينات التي جاءت بها هذه الأشكال على الأنساق المحتملة لاهتزازات الأوتار. وبهذا يكونون قد توصلوا إلى نتيجة محورية ألقت بالضوء على الحلول المذهلة غير المتوقعة التي تقدمها نظرية الأوتار لمشاكل فيزياء الجسيمات التي مكثت طويلاً بلا حلول.

ولنسترجع أن الجسيمات الأولية التي اكتشفها الفيزيائيون تقع في ثلاث عائلات لها نفس التنظيم، حيث تزداد كتلة الجسيمات بالتدريج من عائلة لأخرى. والسؤال المحير الذي لم يكن له أية إجابة قبل ظهور نظرية الأوتار هو: لماذا هناك عائلات؟ ولماذا ثلاث بالذات؟ وإليك ما تقترحه نظرية الأوتار في هذا الصدد. يحتوي شكل كالابي - ياو التقليدي على ثقوب تشبه تلك الموجودة في مركز اسطوانة الفونوغراف، أو الثقوب في الكعكة أو في مجموعة من الكعكات كما هو موضح في الشكل رقم (9-1). وفي مضمون كالابي - ياو للأبعاد العليا، هناك في الواقع تنوع من أنواع مختلفة من الثقوب يمكن أن تظهر - وهي ثقوب يمكن أن تتخذ بدورها أبعاداً متنوعة ("ثقوب متعددة الأبعاد") - لكن الشكل رقم (9-1) يبين لنا الفكرة الأساسية. وقد اختبر عن قرب كل من كانديلاس، وهورويتس، وسترومنغر وويتن تأثير هذه الثقوب على الأنساق المحتملة لاهتزازات الأوتار، وسنرى ما اكتشفوه في ما يلي.

وهناك عائلة لتذبذبات الأوتار ذات الطاقة الأدنى ترتبط بكل ثقب في جزء الفضاء لكالابي - ياو. وحيث أن الجسيمات الأولية المألوفة لا بد من أن تقابل أنساق التذبذبات ذات الطاقة الأدنى، فإن وجود الثقوب المتعددة - التي تشبه إلى

الشكل رقم (9-1)



كعكة، أو طارة مستديرة، وبنات عمومتها متعددة الثقوب.

حد ما تلك الموجودة في الكعكة المتعددة - يعني أن أنساق اهتزازات الأوتار ستقع في عائلات متعددة. فإذا كان لشكل كالابي - ياو ثلاثة ثقوب فإننا سنجد ثلاث عائلات للجسيمات الأولية[16]. وبذا فإن نظرية الأوتار تزعم أن التنظيم العائلي المشاهد تجريبياً هو مجرد انعكاس لعدد الثقوب في الشكل الهندسي الذي يحتوي أبعاداً إضافية، وليس صفة ما غير قابلة للتفسير لمصدر عشوائي أو إلهي. وهذه نتائج من النوع الذي يصيب الفيزيائيين باضطراب في ضربات القلب.

وقد نظن أن عدد الثقوب في أبعاد تقارب أبعاد بلانك المتجعدة - التي تشغل قمة جبل الفيزياء من دون منازع - قد ركلت الآن إلى أسفل حجراً قابلاً للاختبار تجريبياً تجاه مستويات الطاقة المتاحة. وبعد كل ذلك فإن الفيزيائيين يمكن أن يؤسسوا - وقد أسسوا بالفعل - عدد عائلات الجسيمات: 3. وللأسف فإن عدد الثقوب الموجودة في كل من عشرات آلاف أشكال كالابي - ياو المعروفة تنتشر على مدى واسع. فللبعض ثلاثة، وللبعض الآخر 4، 5، 25 وهكذا - وقد يصل عددها إلى 480 ثقباً في البعض. "والمشكلة القائمة في الوقت الحالي أن لا أحد يعرف كيف يستنبط من معادلات نظرية الأوتار أيّاً من أشكال كالابي - ياو يكوِّن الأبعاد الفضائية الإضافية "فلو أمكننا أن نجد المبدأ الذي يسمح بانتقاء أحد أشكال كالابي - ياو من بين الاحتمالات العديدة، فمن المؤكد أن حجراً من أعلى قمة الجبل سيندفع إلى أسفل في معسكر التجريبيين. فإذا كانت معادلات نظرية الأوتار قد أفرزت شكلاً معيناً مفرداً من أشكال كالابي - ياو، وكان هذا الشكل بثلاثة ثقوب، فإننا نكون قد توصلنا بشكل مذهل من نظرية الأوتار لتفسير يشرح سمة معروفة من سمات عالمنا بدون ذلك كانت ستظل غامضة تماماً. لكن اكتشاف المبدأ الذي يمكن به اختيار الشكل المناسب من أشكال كالابي - ياو يمثل مشكلة لم تحل بعد. ومع ذلك - وهي نقطة هامة - فإننا نرى أن نظرية الأوتار تقدم إمكانية الإجابة عن هذا اللغز الأساسي من ألغاز فيزياء الجسيمات، وهو في حد ذاته تقدم محسوس.

وليس عدد العائلات إلا نتيجة تجريبية للأشكال الهندسية للأبعاد الإضافية. ومن خلال تأثيرها في الأنساق المحتملة لاهتزازات الأوتار، فإن النتائج الأخرى

---

(16) بالنسبة للقارئ ذي الميول الرياضية، نشير إلى أن أكثر المقولات الرياضية دقة هي أن عدد العائلات هو نصف القيمة المطلقة لعدد يولر (Euler) في فراغات كالابي-ياو (أشكال كالابي-ياو). وعدد يولر هو المجموع التبادلي للأبعاد في المجموعات المخروطية التشكل - والأخيرة هي ما نشير إليه ببساطة باسم الثقوب عديدة الأبعاد. وهكذا فإن ثلاث عائلات تنبثق من عدد يولر لأشكال كالابي-ياو مساوٍ ± 6 .

للأبعاد الإضافية تتضمن الخواص التفصيلية للقوى وللجسيمات المادية. وكمثال أولي، فقد بينت أبحاث سترومنغر وويتن التي تلت ذلك أن كتلة الجسيمات في كل عائلة تعتمد على - ولنتوقف برهة هنا، لأن الأمر خادع إلى حد ما - الطريقة التي تتقاطع وتتداخل بها حدود الثقوب متعددة الأبعاد في أشكال كالابي - ياو بعضها مع البعض. ومن الصعب أن نتخيل الأمر، لكن الفكرة تكمن في أن الأوتار تتذبذب خلال الأبعاد الإضافية المتجعدة والتنظيم الدقيق للثقوب المختلفة والطريقة التي تتحدب بها أشكال كالابي - ياو حول هذه الأوتار، فإن لكل ذلك تأثيراً مباشراً على أنساق الاهتزازات الرنينية المحتملة. وبالرغم من صعوبة تتبع التفاصيل، ولأن هذه التفاصيل ليست أساسية في الواقع، فإن الأمر المهم، كما في حالة عدد العائلات، هو أن نظرية الأوتار يمكن أن تقدم لنا إطاراً للإجابة عن أسئلة مثل: لماذا للإلكترون وجسيمات أخرى الكتل التي هي عليها، والتي لم تتطرق إليها النظريات السابقة بالمرة. ومرة أخرى، ومع الاستمرار في إجراء مثل هذه الحسابات، فإن الأمر يتطلب معرفة أي بعد إضافي لفراغ كالابي - ياو نأخذه في اعتبارنا.

وتقدم المناقشة السابقة بعض الأفكار عن الكيفية التي يمكن بها يوماً ما لنظرية الأوتار أن تفسر خواص جسيمات المادة المدونة في الجدول رقم (1-1). ويعتقد منظرو نظرية الأوتار أنه سيأتي اليوم الذي يمكن فيه شرح خواص الجسيمات المراسلة للقوى الأساسية المدونة في الجدول رقم (1-2). أي أنه أثناء التواء واهتزاز الأوتار في تموجها خلال الأبعاد الممتدة والمتجعدة فإن مجموعة صغيرة من مخزون الاهتزازات الهائل تتكون من تذبذبات لها حركة مغزلية 1 أو 2. وهذه هي الحالات المرشحة للاهتزازات الوترية الحاملة للقوى. وبصرف النظر عن شكل فراغ كالابي - ياو فإن هناك نسقاً اهتزازياً واحداً ليس له كتلة، لكن حركته المغزلية =2، ونطلق على هذا النسق اسم الغرافيتون. وتعتمد القائمة الدقيقة لجسيمات المراسلة ذات الحركة المغزلية 1 - عددها وشدة القوى التي تنقلها والتناظرات القياسية التي تخضع لها - بصورة جوهرية على الشكل الهندسي الدقيق للأبعاد المتجعدة. وهكذا، ومرة ثانية، نصل إلى التحقق من أن نظرية الأوتار تقدم إطاراً لتفسير محتوى الجسيمات المراسلة الذي نشاهده في عالمنا، أي أنه يشرح خواص القوى الأساسية، ولكن من دون معرفة شكل كالابي - ياو الذي تتجعد فيه الأبعاد الإضافية بالضبط، فإننا لا يمكن أن نتوصل إلى أي تنبؤات مؤكدة أو تفسيرات لما اكتشف مسبقاً (بخلاف ملاحظات ويتن حول التفسير اللاحق للجاذبية).

لماذا لا يمكننا أن نحدد أي شكل من أشكال كالابي - ياو هو "الصحيح"؟ ويعزو معظم منظري نظرية الأوتار ذلك إلى عدم ملاءمة الأدوات النظرية المستخدمة حالياً في تحليل نظرية الأوتار. وكما سنناقش بشيء من التفصيل في الفصل 12، فإن الإطار النظري لنظرية الأوتار معقد بدرجة كبيرة حتى أن الفيزيائيين لم يتمكنوا إلا من إجراء حسابات تقريبية فقط من خلال ترتيبات تعرف باسم نظرية الاضطرابات (Perturbation Theory). وفي هذا المخطط التقريبي، يقف كل شكل من أشكال كالابي - ياو المحتملة على قدم المساواة مع الأشكال الأخرى، أي لا ينفرد أي واحد منها في الأساس عن طريق المعادلات. وحيث أن النتائج الفيزيائية لنظرية الأوتار تعتمد بشكل حساس على الشكل الدقيق للأبعاد المتجعدة، من دون المقدرة على انتقاء أي من فراغات كالابي - ياو من بين الكثيرة الأخرى، فإنه لا يمكن صياغة استنتاجات محددة قابلة للاختبار تجريبياً. والقوى الدافعة وراء الأبحاث هذه الأيام هي تطوير طرق نظرية تتفوق على المنطلق التقريبي، على أمل أن يقودنا ذلك يوماً ما إلى شكل متفرد من أشكال كالابي - ياو للأبعاد الإضافية، وهذا بالإضافة لميزات أخرى. وسنقوم بمناقشة ما يحرز من تقدم في هذا الاتجاه في الفصل 13.

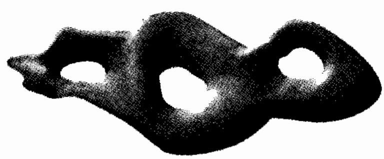
ثالثاً: الاحتمالات الكلية

وهكذا، فإنك قد تتساءل: حتى مع عدم مقدرتنا حتى الآن على اختيار أي شكل من أشكال كالابي - ياو الذي تنتقيه نظرية الأوتار، فهل هناك اختيار يعطي خواص فيزيائية تتطابق مع تلك التي نشاهدها؟ وبمعنى آخر، إذا كان علينا أن نستخرج الصفات الفيزيائية المناسبة والمصاحبة لكل واحد من أشكال كالابي - ياو ثم نجمعها جميعاً في كتالوغ عملاق، فهل ترى سنجد واحداً منها يتفق مع الواقع؟ وهذا سؤال هام، لكن من الصعب الإجابة عنه إجابة شافية لسببين رئيسيين.

ومن المناسب أن نبدأ بالتركيز على أشكال كالابي - ياو التي تعطي ثلاث عائلات. وسيؤدي ذلك إلى اختزال قائمة الاختيارات الهامة بشكل واضح على الرغم من أن الكثير سيتبقى. وفي الحقيقة، لاحظنا أننا نستطيع أن نعيد تشكيل الكعكة متعددة الثقوب من أحد الأشكال إلى عدد من الأشكال الأخرى - وفي الواقع عدد لانهائي من التشكيلات - من دون تغيير عدد الثقوب التي تحتويها. ونوضح في الشكل رقم (9-2) أحد هذه الأشكال التي أعيد تشكيلها من أسفل الشكل رقم (9-1). وبنفس الطريقة يمكن أن نبدأ بفراغ كالابي - ياو ذي

الثلاثة ثقوب لنعيد تشكيله بهدوء من دون أن نغير عدد الثقوب، ومرة أخرى من خلال عدد لانهائي من الأشكال المتتالية. (عندما ذكرنا سابقاً أن هناك عشرات آلاف الأشكال من أشكال كالابي - ياو، فإننا كنا بالفعل نجمع معاً كل تلك الأشكال التي يمكن أن تتغير بعضها إلى البعض الآخر عن طريق مثل تلك التفسيرات الهادئة في التشكيل ، وكنا نعتبر أن كل المجموعة عبارة عن فراغ كالابي - ياو واحد.) وتكمن المشكلة في أن الخواص الفيزيائية التفصيلية لتذبذبات الأوتار وكتلتها وردود فعلها تجاه القوى تتأثر كثيراً بمثل هذه التغيرات التفصيلية في الشكل، لكن ومرة أخرى فإنه ليس لدينا وسائل انتقاء احتمال ما أكثر من الآخر. حتى لو استعان أساتذة الفيزياء بأعداد كبيرة من طلاب الدراسات العليا، فليس من المحتمل التوصل إلى الفيزياء المعبرة عن القائمة اللانهائية للأشكال المختلفة.

الشكل رقم (9-2)



شكل كعكة متعددة الثقوب يمكن إعادة تشكيلها في أشكال كثيرة، ويوضح الشكل واحداً منها، من دون تغيير عدد الثقوب التي تحتويها.

وقد أوصل هذا التيقن منظري نظرية الأوتار إلى أن يختبروا فيزياء عينة من أشكال كالابي - ياو المحتملة. وحتى هنا لم تسر الأمور كما يجب. فالمعادلات التقريبية التي يستخدمها منظرو نظرية الأوتار حالياً ليست بالقدرة الكافية لاستخلاص الفيزياء اللازمة لاختيار شكل من أشكال كالابي - ياو بصورة كاملة. ويمكن لهذه المعادلات أن تساعدنا بطريقة لا بأس بها في فهم خواص اهتزازات الأوتار، التي نأمل أن تتمشى مع الجسيمات التي نشاهدها. لكن الاستنتاجات الفيزيائية المحددة والدقيقة، مثل كتلة الإلكترون أو شدة القوى الضعيفة، تتطلب معادلات أكثر دقة بكثير عن تلك التقريبية المتاحة حالياً. ولنسترجع من الفصل السادس - وبرنامج الثمن المناسب - أن المقياس "الطبيعي" للطاقة في نظرية الأوتار هو طاقة بلانك، وأنه فقط من خلال تلاشيات في غاية الدقة يمكن لنظرية الأوتار أن تقدم أنساقاً اهتزازية لها كتلة في حدود كتلة المادة المعروفة وجسيمات

القوة تتطلب التلاشيات الدقيقة حسابات دقيقة، لأنه حتى الأخطاء الصغيرة قد تؤدي إلى تأثيرات مدوية في دقة النتائج. وكما سنعرض في الفصل 12، ففي منتصف تسعينيات القرن العشرين أحرز الفيزيائيون تقدماً ملحوظاً نحو التغلب على المعادلات التقريبية الحالية، إلا أنه ما زال الطريق أمامهم طويلاً.

وهكذا، أين نقف نحن؟ فحتى مع عدم وجود خصائص أساسية، الأمر الذي يمثل حجر عثرة، يمكن بها انتقاء شكل واحد فقط من أشكال كالابي - ياو الضرورية لاستخلاص نتائج المشاهدة لمثل هذا الاختيار بشكل تام، فإننا ما زلنا نتساءل ما إذا كان هناك أي اختيار من كتالوج كالابي - ياو يوصلنا إلى عالم يتفق ولو تقريباً مع مشاهداتنا. والإجابة على هذا التساؤل مشجعة تماماً. ومع أن معظم الأشكال في كتالوغ كالابي - ياو تعطي نتائج مختلفة بوضوح عن عالمنا (أعداد مختلفة لعائلات الجسيمات وأعداد وأنماط مختلفة من القوى الأساسية، وذلك ضمن اختلافات أخرى محسوسة)، إلا أن القليل من هذه الأشكال يؤدي إلى فيزياء قريبة بشكل كيفي مما نشاهده في الواقع. ويعني ذلك أن هناك أمثلة من فراغات كالابي - ياو التي إذا اخترناها للأبعاد المتجعدة التي تتطلبها نظرية الأوتار فإنها تعطي اهتزازات للأوتار قريبة الشبه بالجسيمات في النموذج القياسي. ومن الأمور ذات الأهمية القصوى أن نظرية الأوتار تُدخل قوى الجاذبية بنجاح في إطار نسيج ميكانيكا الكم.

وبمستوى فهمنا الحالي، فإن هذا الوضع هو أفضل ما كنا نأمل فيه. فإذا اتفق الكثير من أشكال كالابي - ياو ولو بصورة تقريبية مع التجارب، فإن حلقة الوصل بين اختيار معين والفيزياء التي نشاهدها ستصبح أكثر طواعية. وقد تلائم اختيارات عديدة الوضع، وبالتالي لن يتفرد أحد هذه الاختيارات حتى ولو من منظور تجريبي. ومن جهة أخرى، إذا لم يتفق ولو من بعيد جداً أحد أشكال كالابي - ياو مع الخواص الفيزيائية المشاهدة، فسيبدو أن نظرية الأوتار لا تتلاءم مع عالمنا إطلاقاً حتى ولو كانت إطاراً نظرياً رائعاً فإذا وجدت أعداد صغيرة من أشكال كالابي - ياو التي لها المقدرة ولو بشكل تقريبي على تحديد التطبيقات الفيزيائية بالتفصيل، فإنها ستكون في حدود المقبول، الأمر الذي يمثل عائداً مشجعاً بدرجة كبيرة في وقتنا الحاضر.

وسيكون تفسير خواص المادة الأولية وجسيمات القوى من بين أعظم الإنجازات العلمية، إن لم يكن أعظمها. ومع ذلك فقد نتساءل عما إذا كان هناك أي تنبؤات نظرية لنظرية الأوتار - على عكس تفسير ما سبق - يمكن للفيزيائيين

التجريبيين أن يحاولوا تأكيدها إما الآن أو في المستقبل القريب. أجل توجد مثل هذه التنبؤات.

رابعاً: الجسيمات الفائقة

وتجبرنا الصعوبات النظرية، التي تمنعنا من استخلاص تنبؤات تفصيلية من نظرية الأوتار، على البحث عن السمات العامة وليست الخاصة في عالم يتكون من الأوتار. وتشير كلمة العامة هنا إلى الخصائص الأساسية - بدرجة كبيرة - لنظرية الأوتار التي لا تتأثر بتلك الخواص التفصيلية للنظرية التي ما زالت خارج نطاق مقدرتنا، إن لم تكن مستقلة عنها تماماً. ويمكن مناقشة مثل هذه الخواص بكل ثقة حتى ولو كان فهمنا للنظرية ككل منقوصاً وسنعود في الفصول التالية إلى أمثلة أخرى لكننا الآن سنركز على واحد منها، وهو التناظر الفائق.

وكما سبق أن ناقشنا، فإن الخاصية الأساسية لنظرية الأوتار هي كونها عالية التناظر، وهي لا تتضمن فقط مبادئ التناظر الحدسي، بل إنها تتفق كذلك مع أكمل مجالات الرياضيات لهذه المبادئ، وهو التناظر الفائق. ويعني ذلك - كما ناقشنا في الفصل السابع - أن أنساق اهتزازات الأوتار تجيء في أزواج - أزواج الشركاء الفائقين - تختلف بعضها عن بعض بمقدار نصف وحدة في الحركة المغزلية. فإذا كانت نظرية الأوتار صحيحة، فإن بعض اهتزازات الأوتار ستعبر عن الجسيمات الأولية المعروفة. وبناءً على الازدواج فائق التناظر، فإن نظرية الأوتار تقدم تنبؤات عن أن كل جسيمة معروفة لها شريك فائق. ومن الممكن تعيين شحنات القوى التي يجب أن تحملها كل من هذه الجسيمات المشاركة الفائقة، لكننا لا نملك المقدرة في الوقت الحالي على التنبؤ بكتلتها. ومع ذلك فإن التنبؤ بوجود "الشركاء الفائقين" هو سمة عامة لنظرية الأوتار، وهو خاصية صحيحة للنظرية ومستقلة عن سماتها التي لم نتوصل بعد إلى إدراكها.

ولم يُشاهد أحد أبداً حتى الآن الشركاء الفائقين للجسيمات الأولية المعروفة. وقد يعني ذلك أنها لا توجد، وعليه فإن نظرية الأوتار خاطئة. لكن الكثير من فيزيائيي الجسيمات يعتقدون أن ذلك يعني أن الشركاء الفائقين ثقيلون جداً، وبالتالي فهم خارج نطاق مقدرتنا الحالية على ملاحظتهم تجريبياً. ويقوم الفيزيائيون الآن بتشييد معجل عملاق في جنيف بسويسرا يطلق عليه "مصادم هادرون العظيم" (Large Hadron Collider). وتتعاظم الآمال بأن تكون هذه الآلة من القوة بحيث يمكنها اكتشاف الجسيمات المشاركة الفائقة. ومن المتوقع أن يكون المعجل جاهزاً للعمل قبل سنة 2010، وبعد أن يعمل بقليل قد يتأكد وجود

التناظر الفائق تجريبياً. وكما قال شوارتز، "يجب أن يكتشف التناظر الفائق قريباً. وعندما يحدث ذلك سيكون أمراً دراميا"(17). غير أنه يجب أن تأخذ في اعتبارك أمرين. حتى إذا اكتشفت الجسيمات المشاركة الفائقة، فإن هذه الحقيقة وحدها لن تؤكد صحة نظرية الأوتار. وكما رأينا، وبالرغم من أن التناظر الفائق قد اكتشف نتيجة لدراسة نظرية الأوتار، إلا أنه قد ضُمن كذلك بنجاح في نظريات الجسيمات النقاط، وعليه هي ليس مقصور على أصوله الوترية فقط. وبالعكس، وحتى إذا لم تكتشف الجسيمات الشركاء الفائقة بواسطة "معجل هادرون العظيم" فإن تلك الحقيقة وحدها لن تلغي وجود نظرية الأوتار، حيث أن الشركاء الفائقين قد يكونون من الثقل بحيث يصبحون خارج نطاق التعرف عليهم حتى بواسطة هذه الآلة.

خامساً: الجسيمات جزئية الشحنة

بصمة أخرى من بصمات نظرية الأوتار تتعلق بالشحنة الكهربية، وهي أقل عمومية من الجسيمات الشركاء الفائقة، لكنها درامية بنفس الدرجة. وللجسيمات الأولية في النموذج القياسي تنوع محدود من الشحنات الكهربية: فالكواركات والكواركات المضادة لها شحنات كهربية قيمتها ثلث أو ثلثان، والقيم السالبة لهذه الكسور، بينما شحنات الجسيمات الأخرى صفر وواحد وسالب واحد. وتجمع هذه الجسيمات هو المسؤول عن كل المادة المعروفة في الكون. غير أنه في نظرية الأوتار من المحتمل وجود أنساق رنينية اهتزازية تقابل الجسيمات ذات الشحنات الكهربية واضحة الاختلاف. فمثلاً يمكن أن تتخذ الشحنة الكهربية لجسيمة كسوراً ذات قيم غريبة، مثل $\frac{1}{5}$، $\frac{1}{11}$، $\frac{1}{13}$، $\frac{1}{53}$، ضمن تنوع من احتمالات أخرى. وتنشأ هذه الشحنات غير العادية إذا كان للأبعاد المتجعدة خاصية هندسية معينة: الثقوب ذات الخاصية الغريبة والتي تحل الأوتار التي تلفها حولها نفسها فقط بواسطة الدوران عدداً معيناً من المرات(18). وليست التفاصيل هنا هامة بصفة خاصة، لكن يتضح أن عدد مرات الدوران الضرورية لحل الوتر، تتبدى في أنساق الاهتزاز المسموح بها عن طريق تحديد مقام الكسر في التعبير عن الشحنة.

ولبعض أشكال كالابي - ياو هذه الخاصية الهندسية، بينما ليست موجودة في البعض الآخر، ولهذا السبب فاحتمال وجود كسور شحنة كهربية غير عادية

---

(17) حوار مع جون شوارتز في 23 كانون الأول/ ديسمبر 1997.

(18) بالنسبة للقارئ ذي الميول الرياضية، نلاحظ أننا نشير إلى مخروط كالابي-ياو بمجموعة محددة غير عادية تحدد رتبتها في حالات معينة مستوى الشحنة الكسرية (مقام الشحنة الكسرية-الجزئية).

ليس أمراً عاماً مثل وجود الجسيمات الشركاء الفائقة. ومن جهة أخرى، وبينما التنبؤ بوجود الشركاء الفائقين ليس خاصية حكراً على نظرية الأوتار، فإن عقوداً من الخبرة قد أظهرت أنه لا توجد أسباب تفرض وجود مثل كسور الشحنات الكهربية - الغريبة هذه في أية نظرية للجسيمات النقاط. ويمكن إقحام هذه الكسور في نظرية الجسيمات النقاط، لكن الأمر بهذا الشكل سيبدو كالمثل المشهور عن دخول ثور في محل أطقم الصيني. ويؤدي الظهور المحتمل لكسور الشحنة هذه من الخواص الهندسية البسيطة التي يمكن أن تتصف بها الأبعاد الإضافية، إلى جعل هذه الشحنات الكهربية غير العادية بصمة تجريبية طبيعية لنظرية الأوتار.

وكما هو الحال بالنسبة للشركاء الفائقين، فإنه لم تشاهد حتى الآن مثل هذه الجسيمات غريبة الشحنة، وفهمنا لنظرية الأوتار لا يسمح بتنبؤ محدد حول الكتلة التي يجب أن تولدها الصفات الصحيحة للأبعاد الإضافية. وأحد التفسيرات لعدم رؤية الجسيمات ذات الشحنة الجزئية، مرة أخرى، هو أنه إذا وجدت، فإن كتلتها لا بد من أن تكون أكبر مما تستطيعه وسائل التقنية التي نملكها في الوقت الحالي - وفي الواقع، فمن المحتمل أن تكون كتلتها في حدود كتلة بلانك. أما إذا توصلنا يوماً إلى تجربة توصلنا لإدراك مثل هذه الشحنة الغريبة، فسيمثل ذلك دليلاً قوياً جداً على صحة نظرية الأوتار.

سادساً: بعض الاحتمالات الأبعد؟

ما زالت هناك بعض الطرق التي قد نجد فيها أدلة على صحة نظرية الأوتار. فمثلاً، أشار ويتن إلى بُعد احتمال أن يرى الفلكيون يوماً ما دليلاً مباشراً على صحة نظرية الأوتار في البيانات التي يجمعونها من مشاهداتهم للسماء. وكما أشرنا في الفصل السادس، فإن حجم الوتر هو طول بلانك النموذجي، أما الأوتار الأعلى طاقة فيمكن لها أن تنمو أكثر بشكل محسوس. وفي الواقع، فإن طاقة الانفجار الهائل كانت من الكبر بحيث أنتجت عدداً قليلاً من الأوتار الضخمة التي من خلال التمدد الكوني قد نمت لتصل إلى مقاييس فلكية. ويمكن أن نتخيل الآن أو في وقت ما في المستقبل وجود وتر من هذا النوع قد يمرق عبر السماء الليلية تاركاً بصمة لا تخطئها العين يمكن قياسها على البيانات التي يجمعها الفلكيون (مثل إزاحة صغيرة في درجة حرارة الأرضية الميكروية الإشعاعية الكونية[19]). وكما قال ويتن : "وبالرغم من أن هذا خيالي بعض الشيء، إلا أنه هو السيناريو

(19) انظر الفصل 14 من هذا الكتاب.

المفضل عندي لتأكيد صحة نظرية الأوتار، حيث لا يوجد شيء آخر يجيب عن ذلك بهذه الصورة الدرامية مثل مشاهدة الوتر بالتليسكوب"[20].

وبواقعية أكثر، فإن هناك بصمات تجريبية محتملة أخرى لنظرية الأوتار قد طرحت. وسنسرد هنا خمسة أمثلة على ذلك. الأول، لاحظنا في الجدول رقم (1-1) أننا لا نعرف هل النيوترينوات خفيفة جداً أم أنه ليس لها كتلة بالمرة. ووفقاً للنموذج القياسي فإنها عديمة الكتلة، ولكن لا يوجد أي سبب لذلك بالمرة. والتحدي الذي يواجه نظرية الأوتار هو أن تقدم لنا تفسيراً مقنعاً للبيانات حول النيوترينوات حالياً ومستقبلاً، وبصفة خاصة إذا أظهرت التجارب في النهاية أن للنيوترينوات كتلة ضئيلة جداً لكنها ليست صفراً. الثاني، هناك بعض العمليات الافتراضية والتي لا يسمح بها النموذج القياسي، لكن قد تسمح بها نظرية الأوتار. ومن بين هذه الافتراضات التفكك المحتمل للبروتون (لا تقلق، فإن كان مثل هذا التفكك صحيحاً فإنه سيحدث ببطء شديد) والطفرات والتحللات المحتملة لتجمعات الكواركات المختلفة، في تعارض مع الخواص المستقرة منذ زمن طويل لنظرية مجال الكم للجسيمات النقاط[21]. وهذه الأنواع من العمليات شيقة بصفة خاصة لأن عدم وجودها في النظريات المتفق عليها يجعلها إشارات حساسة للفيزياء لا يمكن احتسابها إلا باللجوء إلى مبادئ نظرية جديدة. وبرصد أية واحدة من هذه العمليات، فإن ذلك يقدم أرضاً خصبة لنظرية الأوتار لتقدم بدورها تفسيراً. أما السبب الثالث، فهناك أنساق معينة لاهتزازات الأوتار يمكن أن تساهم بفاعلية في مجالات قوى جديدة بعيدة المدى ودقيقة، وهذا في حالة اختيارات معينة لأشكال كالابي - ياو. ولو تم اكتشاف تأثيرات لمثل هذه القوى فإن ذلك سيعكس بعضاً من الفيزياء الجديدة لنظرية الأوتار. والسبب الرابع، وكما سنلاحظ في الفصل القادم، فقد جمع الفلكيون أدلة عن أن مجرتنا ومن المحتمل أن يكون الكون كله يسبح في حمام من المادة المظلمة (Dark Matter) لم يتم التعرف على كنهها حتى الآن. وتقترح نظرية الأوتار، من خلال أنساقها العديدة الممكنة للاهتزاز الرنيني، وجود عدد من الاحتمالات للمادة المظلمة، إلا أن الحكم على هذه الاحتمالات لابد أن ينتظر النتائج التجريبية المستقبلة التي تتحقق منها الخواص التفصيلية للمادة المظلمة.

---

(20) حوار مع إدوارد ويتن في 4 آذار/ مارس 1998.

(21) بالنسبة لذوي الخبرة، نشير إلى أن بعض هذه العمليات تنتهك قاعدة الحفاظ على عدد ليبتون، وكذلك تناظر زمن تكافؤ الشحنة العكسي Charge-Parity-Time (CPT) Reversal Symmetry.

وأخيراً، السبب الخامس لربط نظرية الأوتار بالمشاهدات يتضمن الثابت الكوني - ولنتذكر كما سبق أن ناقشنا في الفصل الثالث أن ذلك كان التعديل المؤقت الذي أدخله آينشتاين على المعادلات الأصلية للنسبية العامة ليؤكد سكون الكون (كون ستاتيكي). ومع أن ما تبع ذلك من اكتشاف أن الكون في حالة تمدد جعل آينشتاين يسحب تعديله، فقد أيقن الفيزيائيون منذ ذلك الوقت أنه لا يوجد تفسير لقيمة الثابت الكوني المساوية للصفر. ويمكن تفسير الثابت الكوني على أنه نوع من الطاقة الشاملة المخزونة في فراغ الفضاء، وعلى ذلك فإن قيمته يجب أن تكون نظرياً قابلة للحساب، وعملياً يمكن قياسها. لكن وحتى اليوم فقد أدت مثل تلك الحسابات والقياسات إلى تناقضات هائلة: أظهرت الملاحظات أن الثابت الكوني إما أن يكون صفراً (كما اقترح آينشتاين في النهاية) أو أن تكون قيمته ضئيلة جداً؛ وتشير الحسابات إلى أن التأرجحات الكمية في فراغ الفضاء الخالي تميل إلى توليد ثابت كوني لا يساوي الصفر، وتبلغ قيمته 120 رتبة (1 متبوعاً من اليمين بعدد 120 صفر) أكبر مما تسمح به التجربة! ويمثل ذلك تحدياً رائعاً وفرصة لمنظري نظرية الأوتار: هل يمكن لحسابات نظرية الأوتار أن تنقح هذه التناقضات وتفسر لماذا يكون الثابت الكوني صفراً؟ وإذا أثبتت التجارب في النهاية أن قيمة هذا الثابت صغيرة وليست صفراً، فهل يمكن للنظرية أن تقدم تفسيراً لذلك؟ وهل سيتمكن منظرو نظرية الأوتار من أن يرتقوا إلى مستوى هذا التحدي - فهم لم يصلوا بعد إلى ذلك - لأنه لو حدث ذلك لأصبح لدينا دليل مفحم يدعم نظرية الأوتار.

ثامناً: التثمين

يحفل تاريخ الفيزياء بأفكار تبدو لأول وهلة غير قابلة للاختبار بالمرة، لكن، ومن خلال عدد من التطورات غير المتوقعة، أمكن إخضاعها في النهاية إلى عالم التحققات التجريبية. وما مفهوم أن المادة مكونة من ذرات، وفرضية باولي حول وجود جسيمات النيوترينو الشبح، واحتمال أن تكون السماء مرصعة بالنجوم النيوترونية والثقوب السوداء، إلا ثلاثة أفكار بارزة تمثل صحة هذه المقولة - فالأفكار التي نتقبلها الآن كلية كانت عند بدء ظهورها تبدو استغراقاً في الخيال العلمي أكثر منها سمات لحقائق علمية.

والدافع لطرح نظرية الأوتار هو على الأقل في مثل قوة أي من الأفكار الثلاثة السابقة - في الواقع فقد تُوِّجت هذه النظرية كأكثر التطورات في الفيزياء النظرية أهمية وإثارة منذ اكتشاف ميكانيكا الكم. وهي مقارنة جريئة بصفة خاصة

لأن تاريخ ميكانيكا الكم يعلمنا أن الثورات في الفيزياء يمكن أن تستغرق ببساطة عدة عقود حتى تصل إلى النضج. وبالمقارنة بمنظري نظرية الأوتار اليوم، فإن الفيزيائيين الذين أوجدوا ميكانيكا الكم كانت فرصتهم أفضل. فميكانيكا الكم، وحتى قبل أن تكتمل تماماً، كان في استطاعتها الاتصال المباشر مع النتائج التجريبية. ومع ذلك فقد استغرق الأمر قرابة ثلاثين عاماً لتخرج البنية المنطقية لميكانيكا الكم إلى الوجود، كما استغرق الأمر عشرين سنة أخرى تقريباً لتضمين النسبية الخاصة كلياً في هذه النظرية. ونحن الآن نعمل على تضمين النسبية العامة فيها، وهي المهمة الأكثر تحدياً بكثير، والأكثر من ذلك، فإن هذا الأمر يجعل من الارتباط مع التجارب عملية أكثر صعوبة. وعلى عكس أولئك الذين أخرجوا النظرية الكمية إلى الوجود، فإن منظري نظرية الأوتار اليوم لا يملكون طريقاً ممهداً من الطبيعة - من خلال نتائج تجريبية تفصيلية - يقودهم من خطوة إلى أخرى.

ويعني ذلك أنه يمكن أن نتصور جيلاً أو أكثر من الفيزيائيين وقد أوقفوا حياتهم على دراسة وتطوير نظرية الأوتار من دون عائد يذكر من التجارب. ويعرف العدد الهائل من الفيزيائيين على مستوى العالم الذين يتابعون بحماس نظرية الأوتار أنهم يخاطرون: فالجهد الذي يستغرق حياة كاملة قد يؤدي بهم إلى نهايات منقوصة وغير حاسمة. وبلا جدال فإن التقدم النظري المحسوس سيستمر، لكن هل سيكون ذلك كافياً للتغلب على العقبات الحالية ويوصلنا إلى تنبؤات محددة وقابلة للاختبار تجريبياً؟ فهل ستؤدي الاختبارات غير المباشرة التي ناقشناها في ما سبق إلى أدلة حقيقية واضحة على صحة نظرية الأوتار؟ وتقع هذه التساؤلات في مركز اهتمام كل منظري نظرية الأوتار، لكنها كذلك أسئلة لا شيء يقال حولها في الواقع. ولن تتضح إجاباتها إلا بمرور الزمن. فالبساطة الرائعة لنظرية الأوتار، والطريقة التي يستأنس بها التناقض بين الجاذبية وميكانيكا الكم، وقدرتها على توحيد كل مكونات الطبيعة، ومقدرتها الكامنة غير المحدودة على التنبؤ، كل هذا يقدم إلهاماً ثرياً يجعل الأمر يستحق المخاطرة.

وقد دُعِّمت هذه الاعتبارات الرائعة بصفة دائمة بواسطة مقدرة نظرية الأوتار على الكشف بشكل ملحوظ عن خصائص فيزيائية جديدة لعالم مبني على الأوتار - وهي خصائص تكشف عن تماسك عميق ورائع في عمل الطبيعة. والكثير من التغييرات الواردة أعلاه ذو عمومية لدرجة أنه بالرغم من التفاصيل غير المعروفة حالياً، فإنها ستصبح الصفات الأساسية لعالم مشيد من الأوتار. وسيكون لأكثر هذه الصفات دهشة تأثير مدوٍّ على فهمنا المتطور أبداً عن الفضاء والزمان.

القسم الرابع

نظرية الأوتار ونسيج الزمكان

الفصل العاشر

الهندسة الكمية

في خلال ما يقرب من عقد من الزمان، قام آينشتاين وحده بإلغاء الإطار النيوتوني الذي ظل سائداً لعدة قرون، وأعطى العالم مفهوماً جديداً وعميقاً للجاذبية بصورة راديكالية. ولم يستغرق الأمر طويلاً بالنسبة للخبراء وغير الخبراء على حد سواء ليتكالبوا على العبقرية والبناء الأصيل لإنجازات آينشتاين في صياغته للنسبية العامة. ولكن يجب ألا نغض النظر عن الظروف التاريخية المناسبة التي ساهمت بقوة في نجاح آينشتاين. وفي مقدمة هذه الظروف كانت رؤية جورج برنارد ريمان عالم الرياضيات في القرن التاسع عشر، الذي أسس بقوة الوسائل الهندسية لوصف الفراغات المحدبة ذات الأبعاد الاختيارية. وقد حطم ريمان قيود الأفكار الإقليدية عن الفراغ المسطح في محاضرته الافتتاحية الشهيرة عام 1854 بجامعة غوتنجن، فمهد بذلك الطريق نحو معالجة رياضية ديمقراطية لهندسة مختلف الأسطح المحدبة. وقد كانت آراء ريمان هي نفسها التي زودتنا بالرياضيات اللازمة لتحليل الفراغات المعوجة كمياً مثل تلك التي في الشكلين رقمي (3–4) و(3–6). وتظهر عبقرية آينشتاين في استخدامه رياضيات ريمان وكأنها فُصِّلَت خصيصاً لتطبيقها في رؤيته الجديدة لقوى الجاذبية. وقد أعلن بجرأة أن رياضيات هندسة ريمان تتواءم تماماً مع فيزياء الجاذبية.

لكن الآن، وبعد قرن تقريباً من إنجاز آينشتاين المغري فإن نظرية الأوتار تقدم وصفاً كمياً للجاذبية، يعدل بالضرورة من النسبية العامة عندما تتضاءل المسافات المعنية لتصل إلى طول بلانك. وحيث أن هندسة ريمان هي لب النسبية العامة فإن هذا يعني أنها لا بد أن تتمحور لتلائم بصدق الفيزياء الجديدة للمسافات القصيرة في نظرية الأوتار. وبينما تؤكد النسبية العامة على أن هندسة ريمان تصف الخواص المحدبة للكون، فإن نظرية الأوتار تؤكد على أن هذا صحيح فقط إذا اختبرنا نسيج الكون على مسافات أطول بما فيه الكفاية. وعلى مسافات قصيرة مثل طول بلانك لا بد أن يظهر نوع جديد من الهندسة، وهو النوع الذي يتواءم مع الفيزياء الجديدة لنظرية الأوتار. ويسمى هذا الإطار الهندسي

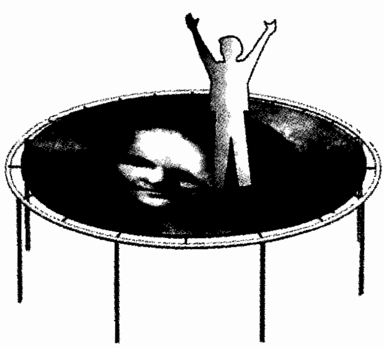
الجديد باسم "الهندسة الكمية".

وعلى عكس حالة هندسة ريمان، لم يكن هناك لحن جاهز على رف الرياضيين يمكن أن يطوعه منظرو نظرية الأوتار في خدمة الهندسة الكمية. وبدلاً من ذلك فإن الفيزيائيين والرياضيين يدرسون الآن بهمة نظرية الأوتار ويجمعون شيئاً فشيئاً أجزاء فرع جديد من الفيزياء والرياضيات. وبالرغم من أن القصة الكاملة لم تكتب بعد، فإن هذه الدراسات قد كشفت بالفعل عن الكثير من الخواص الهندسية الجديدة للزمكان نتجت من نظرية الأوتار - الخواص التي بكل تأكيد كانت ستذهل حتى آينشتاين.

أولاً: قلب هندسة ريمان

إذا قمت بالقفز فوق ترامبولين (Trampoline) فإن وزنك سيتسبب في انثنائه نتيجة لتمدد نسيجه المرن. ويكون التمدد في أقصى حالاته تحت قدميك مباشرة، بينما يكون أقل ما يمكن عند أطراف الترامبولين. وتستطيع ملاحظة ذلك بوضوح إذا كانت هناك صورة مألوفة مثل الموناليزا مرسومة على سطح الترامبولين. وعندما يكون الترامبولين لا أحد عليه فإن صورة الموناليزا تبدو عادية، لكن عندما تقف على الترامبولين فإن الصورة ستنبعج، وبالأخص الجزء الواقع تحت قدميك كما هو موضح في الشكل رقم (10-1).

الشكل رقم (10-1)



عند الوقوف فوق ترامبولين عليه صورة الموناليزا فإن الشكل يضطرب أكثر ما يمكن تحت قدميك.

وينفذ هذا المثال مباشرة في صلب الإطار الرياضي لبريمان الذي يصف الأشكال المعوجة. وتأسيساً على الأفكار المبكرة للرياضيين كارل فريدريك جاوس (Carl Friedrich Gauss) ونيقولاي لوباتشيفسكي (Nikolai Lobachevsky) وغانوس بولياي (Janos Bolyai) وآخرين، بيّن ريمان أن التحليل الدقيق للمسافات بين كل المواقع على جسم ما أو فيه تقدم وسيلة لتحديد مقدار تحدبه. وبالتقريب، فإنه كلما زاد التمدد (غير المنظم) كلما زاد الحيود عن علامات الأبعاد على الشكل المسطح، وكلما زاد تحدب الجسم. فمثلاً يكون أقصى تمدد لترامبولين بالضبط تحت قدميك، ولهذا فإن علاقة المسافات بين النقاط في هذه المنطقة تصبح الأكثر اضطراباً وبذلك فإن هذه المنطقة من الترامبولين تكون قد عانت أكبر قدر من التحدب، ويتمشى ذلك مع ما كان متوقعاً، حيث أن ذلك هو الموقع الذي تعاني فيه الموناليزا أقصى اضطراب، الأمر الذي يؤدي إلى ملامح اقتضاب في ركن ابتسامتها الأخاذة المعتادة.

طوّع آينشتاين اكتشافات ريمان الرياضية بأن منحها تفسيراً فيزيائياً دقيقاً وقد بيّن، كما سبق أن ناقشنا في الفصل الثالث، أن تحدب الزمكان يتضمن قوى الجاذبية. ولنمعن الفكر الآن في هذه التفسيرات عن قرب أكثر. ومن وجهة نظر الرياضيات فإن تحدب الزمكان - مثل تحدب الترامبولين - يعكس العلاقات المضطربة للمسافات بين مواقعه. وفيزيائياً، فإن قوى الجاذبية التي يحس بها أي جسم هي انعكاس مباشر لهذا الاضطراب. وكلما جعلنا الجسم يصغر أكثر فأكثر، فإن الفيزياء والرياضيات ستتواءم أكثر وأكثر باقترابنا من التيقن من المفهوم الرياضي المجرد عن النقطة. لكن نظرية الأوتار تحد من الدقة التي يمكن بها التحقق من الصياغة الهندسية لبريمان بواسطة فيزياء الجاذبية، لأن هناك حداً لمدى تناهي صغر أي جسم. وبمجرد وصولك إلى الأوتار لا تستطيع أن تذهب أبعد من ذلك. ولا يوجد مفهوم تقليدي عن الجسيمة النقطة في نظرية الأوتار - وهذا هو العنصر الأساسي في مقدرة هذه النظرية على تقديم نظرية كمية للجاذبية. ويبين ذلك بكل ثقة أن الإطار الهندسي لريمان، الذي يقوم أساساً على المسافات بين النقاط قد عُدِّل عند المقاييس المجهرية بواسطة نظرية الأوتار.

ولهذه الملاحظات تأثير ضئيل جداً في الاستخدامات الماكروية العادية للنسبية العامة. ففي الدراسات الفلكية، على سبيل المثال، يصور الفيزيائيون المجرات على أنها نقاط، حيث أن حجمها دقيق جداً بالنسبة للكون ككل. ولهذا السبب فقد أثبت تطبيق الإطار الهندسي لريمان، بهذه الطريقة التقريبية، أنه تقريب

دقيق جداً، كما يشهد بذلك نجاح النسبية العامة في الإطار الكوني. أما في العالم المجهري الفائق، فإن الطبيعة الممتدة للأوتار تؤكد أن هندسة ريمان لن تكون ببساطة الصياغة الرياضية الصحيحة. وبدلاً من ذلك، كما سنرى الآن، لا بد أن تحل الهندسة الكمية لنظرية الأوتار محلها، مما يؤدي إلى خواص جديدة دارمية وغير متوقعة.

ثانياً: الملعب الكوني

تبعاً لنموذج الانفجار الهائل في علم الكون، فإن كل العالم قد انبثق بعنف من انفجار عالمي مفرد منذ حوالى 15 مليار سنة مضت. واليوم، وكما تم اكتشافه في الأصل بواسطة هابل، فإننا يمكن أن نرى "شظايا" هذا الانفجار على شكل المليارات الكثيرة من المجرات التي ما زالت تتباعد إلى الخارج. فالكون في حالة تمدد. ولا نعلم هل سيستمر هذا التمدد إلى الأبد أم سيأتي وقت يتباطأ عنده ثم يتوقف التمدد لينعكس اتجاهه بعد ذلك مؤدياً إلى انهيار كوني إلى الداخل. ويحاول الفلكيون وفيزيائيو الفلك الإجابة عن هذا السؤال تجريبياً، حيث أن تلك الإجابة تكمن في شيء يمكن قياسه: متوسط كثافة المادة في الكون.

فإذا تجاوز متوسط كثافة المادة ما يعرف بالكثافة الحرجة (Critical Density) التي تبلغ حوالى جزء من مائة من جزء من المليار من جزء من المليار من جزء من المليار (10^{-29}) جرام لكل متر مكعب من الكون - فإن قوى جاذبية كبيرة بما يكفي ستجتاح الكون لتوقف ثم تعكس اتجاه التمدد. أما إذا كان متوسط كثافة المادة أقل من القيمة الحرجة، فإن شد الجاذبية سيكون من الضعف بحيث لا يستطيع إيقاف التمدد، الذي سيستمر للأبد. (وقد تظن بناء على ملاحظاتك الشخصية للكون، أن متوسط كثافة كتلة الكون تتعدى بكثير القيمة الحرجة. لكن إذا أخذت في الاعتبار أن المادة - مثل النقود - تميل إلى التجمع، وإذا استخدمنا متوسط كثافة كتلة الأرض، أو النظام الشمسي أو حتى مجرة درب اللبانة كمؤشر على كثافة العالم ككل، فإن ذلك سيكون بمثابة اتخاذ ثروة بيل غيتس كمؤشر لمتوسط ثروة سكان الأرض. وكما أن هناك الكثير من الناس الذين تتضاءل ثروتهم مقارنة بثروة بيل غيتس، وبالتالي تقلل بشدة من قيمة المتوسط، فإن هناك الكثير من الفضاء الفارغ بين المجرات، الأمر الذي يقلل بشكل درامي من المتوسط العام لكثافة المادة).

وبالدراسة الدقيقة لتوزيع المجرات في الفضاء، يمكن للفلكيين أن يحصروا بشكل جيد كمية المادة المرئية في الكون. وقد اتضح أن قيمتها أقل من القيمة

الحرجة بشكل ملحوظ. غير أن هناك دليلاً نظرياً وتجريبياً قوياً على أن الكون يعج بمادة مظلمة. وهذه هي المادة التي لا تساهم في عمليات الاندماج النووي التي تمد النجوم بالطاقة، وعليه فهي لا تصدر ضوءاً؛ ولذلك فهي لا تُرى بالتلسكوبات الفلكية. ولم يتمكن أحد من معرفة كنه المادة المظلمة، ولا نقول كميتها الموجودة بالضبط. وبذلك فإن قدر الكون المتمدد حالياً ما زال غير واضح.

ولنفرض جدلاً أن كثافة كتلة الكون تتعدى القيمة الحرجة، وأنه يوماً ما في المستقبل البعيد سيتوقف التمدد وسيبدأ الكون في الانهيار على نفسه إلى الداخل، وستبدأ كل المجرات في الاقتراب بعضها من البعض ببطء، وبمرور الوقت ستزداد سرعات اقترابها إلى أن تندفع جميعاً في سرعة مخيفة. ونحتاج إلى أن نتخيل أن كل الكون سيتقلص إلى كتلة كونية منكمشة للغاية. وكما ذكرنا في الفصل الثالث، سينكمش الكون من حجم أقصى يبلغ مليارات السنوات الضوئية إلى أن يبلغ ملايين السنوات الضوئية، مكتسباً سرعة متزايدة في كل لحظة مثل كل الأشياء عندما تنسحق معاً إلى أن تصل إلى حجم مجرة واحدة، ثم تصل إلى حجم نجم واحد، ثم إلى حجم كوكب، ثم إلى حجم برتقالة، ثم إلى حجم حبة بازلاء، ثم حجم حبة رمل، ووفقاً للنسبية العامة ستصل إلى حجم جزيء واحد، ثم حجم ذرة واحدة، ثم أخيراً تصل إلى مضغة كونية صلبة لتصل إلى "لاحجم". وتبعاً للنظرية المتفق عليها فإن الكون قد بدأ انفجاره من حالة حجم مساوٍ للصفر، وإذا كانت كتلته كبيرة بما فيه الكفاية، فإنه سينتهي بأن ينسحق إلى حالة مماثلة من الانضغاط الكوني النهائي.

غير أنه عندما تصل المسافات المعينة إلى ما يقرب من طول بلانك أو أقل، فإن ميكانيكا الكم تبطل فعل معادلات النسبية العامة، كما نعرف كلنا الآن. ولا بد بدلاً من ذلك من الاستفادة من نظرية الأوتار. وهكذا وبينما تسمح النسبية العامة لآينشتاين بالشكل الهندسي للكون أن يتضاءل اختيارياً - بنفس الطريقة بالضبط التي تسمح بها رياضيات هندسة ريمان لشكل مجرد ليتخذ حجماً يصل إلى أصغر ما يمكن تخيله - فإن الأمر يقودنا لنتساءل عن الكيفية التي تعدل بها نظرية الأوتار هذه الصورة. وكما سنرى الآن، فإن هناك دليلاً على أن نظرية الأوتار تضع حداً أدنى، مرة أخرى، لمقياس المسافات المتاحة فيزيائياً، وتزعم بصورة جديدة تماماً أن الكون لا يمكن أن ينضغط إلى حجم أصغر من طول بلانك في أي بعد من أبعاده الفضائية.

وبناءً على الألفة التي بينك وبين نظرية الأوتار، فقد يغريك ذلك بالمخاطرة

بأحد التنبؤات عن كيفية حدوث ذلك. وقد تجادل بعد كل ذلك بأنه لا يهم كم عدد النقاط التي تتكوم بعضها فوق البعض - الجسيمات النقاط - فإن حجمها الشامل ما زال صفراً. وعلى النقيض، لو كانت هذه الجسيمات أوتاراً بالفعل، وانهارت معاً بشكل عشوائي تماماً، فسيكون لها حجم رقعة مختلف عن الصفر، وتقريباً مثل كرة من خيوط مطاطية رفيعة لها حجم بلانك. وإذا فكرت بهذا الشكل فستكون على الطريق الصحيح، لكنك قد تفتقد سمات هامة ودقيقة عن كون نظرية الأوتار يمكن توظيفها بشكل رائع لتقترح حجماً أدنى للكون. وتؤكد هذه السمات بكل ثقة على صحة فيزياء الأوتار الجديدة التي دخلت الساحة، وعلى تأثيرها في هندسة الزمكان.

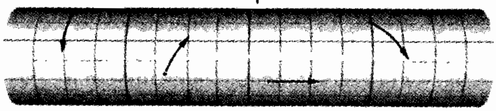
وحتى نفسر هذه الأمور الهامة، فلنستخدم مثالاً يستبعد التفاصيل العرضية من من دون المساس بالفيزياء الجديدة. وبدلاً من التعامل مع كل الأبعاد العشرة للزمكان في نظرية الأوتار - أو حتى الأبعاد الأربعة الممتدة للزمكان التي نألفها - لنرجع مرة أخرى إلى لعالم خرطوم المياه. وقد أدخلنا هذا العالم ثنائي الأبعاد الفضائية في الأصل، في الفصل الثامن، ضمن إطار سابق لنظرية الأوتار لتفسير بعض وجهات نظر كالوزا وكلاين في عشرينيات القرن العشرين. ولنستخدم ذلك كملعب كوني لتدريس خواص نظرية الأوتار بشكل مبسط، وسنستخدم حالاً الآراء التي اكتسبناها لنحسن من فهمنا لكل ما تتطلبه نظرية الأوتار من أبعاد فضائية. وفي هذا الاتجاه فإننا نتخيل البعد الدائري لعالم خرطوم المياه الذي يبدأ رائعاً وممتلئاً ثم ينكمش إلى أحجام أصغر فأصغر، مقترباً من الأرض الخطية - الصورة الجزئية المبسطة للانهيار الهائل (Big Crunch).

والسؤال الذي نبحث عن إجابة عنه هو ما إذا كانت الخواص الهندسية والفيزيائية لهذا الانهيار العالمي لها سمات تختلف بجلاء بين عالم مؤسس على الأوتار وآخر مؤسس على الجسيمات النقاط.

ثالثاً: السمة الأساسية الجديدة

ليس علينا أن نذهب بعيداً في بحثنا عن فيزياء الأوتار الأساسية الجديدة. ويمكن لجسيمة نقطة تتحرك في عالم ذي بعدين أن تأتي بأنواع الحركات الموضحة في الشكل رقم (10-2): تستطيع أن تتحرك على طول البعد الممتد للخرطوم، كما أنها تستطيع أن تتحرك على طول الجزء المتجعد للخرطوم، أو تتحرك حركة وسيطة بين الاثنين. وتستطيع حلقة وترية أن تتحرك بنفس الطريقة مع فارق واحد هو أنها تتذبذب أثناء حركتها على السطح، كما في الشكل رقم (10-

الشكل رقم (10-2)



حركة الجسيمات النقاط فوق اسطوانة.

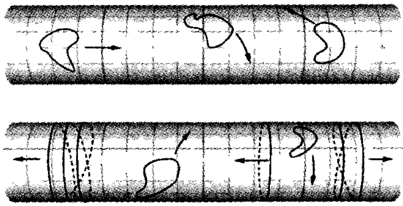
3)، (a). وقد ناقشنا هذا التمايز من قبل بشيء من التفصيل: تذبذب الأوتار يصبغ عليها صفات مثل الكتلة وشحنات القوى. ومع أن ذلك من الأمور الأساسية في نظرية الأوتار، إلا أنها ليست في مركز اهتمامنا حيث أننا قد فهمنا بالفعل تطبيقاتها الفيزيائية.

وفي المقابل، فإن اهتمامنا الحالي ينصب على اختلاف آخر بين حركة الجسيمة النقطة وحركة الوتر، وهو الاختلاف الذي يعتمد مباشرة على "شكل" الفضاء الذي يتحرك فيه الوتر. وحيث أن الوتر شيء ممتد، فإن هناك ترتيبات أخرى محتملة غير تلك التي ذكرت من قبل: فهو يستطيع أن يدور - أو يمكن القول بأنه لاسو[*] - حول الجزء الدائري من عالم الخرطوم كما هو موضح في الشكل رقم (10-3)، (b)[1] وسيواصل الوتر انزلاقه وذبذبته إلا أنه سيقوم بذلك في هيئات ممتدة. وفي الواقع يستطيع الوتر أن يلتف حول الجزء الدائري للفضاء أي عدد من المرات كما هو موضح في الشكل (10-3)، (b)، وسيقوم مرة أخرى بحركة تذبذبية أثناء انزلاقه. وعندما يعالم الوتر في مثل هذه الهيئة الملفوفة، فإننا نطلق عليه "نمط الحركة الدائرية". ومن الواضح أن وجود الوتر في نمط الحركة الدائرية ما هو إلا إمكانية كامنة في الأوتار. ولا يوجد مثل ذلك في الجسيمات النقاط. ونحن نرمي الآن إلى فهم تطبيقات هذا النوع الكيفي الجديد من حركة الوتر على الأوتار نفسها وكذلك على الخواص الهندسية للبعد الذي يدور حوله.

(*) حبل في طرفه أنشوطة يستعمل في اقتناص الخيل (المترجم والمراجع).

(1) وتكملةً للموضوع، فإننا نشير إلى انه على الرغم من أن معظم ما تطرقنا إليه حتى هذه اللحظة من الكتاب ينطبق بنفس المقدار على الأوتار المفتوحة (الوتر ذو النهايات الحرة) أو حلقات الأوتار المغلقة (الأوتار التي ركزنا عليها)، فإن الموضوع الذي سنناقشه هنا يظهر فيه نوعان من الأوتار قد يبدو أن لهما صفات مختلفة. وفي النهاية، فإن الأوتار المفتوحة لن تتشابك أو تتعقد بالالتفاف حول بعد دائري. ومع ذلك، ومن خلال الأبحاث التي لعبت دوراً حيوياً في ثورة الأوتار الفائقة الثانية، بين جو بولتشينسكي من جامعة كاليفورنيا في سانتا باربارا سنة 1989 واثنين من تلاميذه هما جيان-هيو داي، وروبرت ليه، بينوا كيف تتواءم الأوتار المفتوحة تماماً مع الاستنتاجات التي وجدناها في هذا الفصل.

الشكل رقم (10-3)



(a)

(b)

تستطيع الأوتار أن تتحرك فوق الاسطوانة بطريقتين مختلفتين - في هيئة غير ملفوفة، وفي هيئة ملفوفة.

رابعاً: فيزياء الأوتار الملتوية

ركزنا من خلال مناقشاتنا السابقة لحركة الأوتار على الأوتار غير الملتوية. وتشترك الأوتار الملتفة حول عالم فضائي دائري في أغلب الخواص مع الأوتار التي درسناها. وتساهم اهتزازات هذه الأوتار، وبشدة في الخواص الظاهرية بنفس الشكل مثل تلك غير الملتوية. والاختلاف الرئيسي في حالة الأوتار الملتوية هو أن لها كتلة "دنيا" تتحدد بمقاييس البعد الدائري وعدد لفات الوتر. وتحدد الحركة التذبذبية للوتر مدى المساهمة في زيادة الكتلة عن الحد الأدنى.

وليس من الصعب إدراك أصل ذلك الحد الأدنى للكتلة. ويتوقف الطول الأدنى للوتر الملفوف على محيط البعد الدائري وعدد لفات الوتر حوله. ويحدد الحد الأدنى لطول الوتر كتلته الدنيا: فكلما زاد طول الوتر زادت كتلته لزيادة حجمه. وحيث أن محيط الدائرة يتناسب مع نصف قطرها، فإن الحد الأدنى لعدد اللفات يتناسب مع نصف قطر الدائرة التي يلتف حولها الوتر. وباستخدام علاقة الكتلة بالطاقة لآينشتاين يمكن القول إن الطاقة الكامنة في الوتر الملتف تتناسب مع نصف قطر البعد الدائري. (وللأوتار غير الملفوفة كذلك حد أدنى للطول، لأنه إذا لم يكن لها هذا الحد الأدنى، فسيعيدنا ذلك إلى عالم الجسيمات النقاط. ويؤدي نفس المنطق إلى أن للأوتار غير الملفوفة كتلة دنيا قد تكون ضئيلة جداً لكنها ليست صفراً. وهذا صحيح بشكل ما، لكن تأثير ميكانيكا الكم الذي تعرضنا له في الفصل السادس - ولنتذكر "السعر المناسب" - قادر على أن يلاشي تماماً هذه المشاركة في الكتلة. ولنسترجع أن هذا هو السبب الذي يؤدي إلى أن تعطي الأوتار غير الملفوفة جسيمات لا وزن لها مثل الفوتون والغرافيتون والجسيمات الأخرى عديمة الوزن أو ذات الوزن القريب من الصفر. غير أن الأوتار الملفوفة تختلف في هذا الشأن).

كيف يؤثر وجود أشكال الأوتار الملفوفة في الخواص الهندسية للأبعاد التي تلتف حولها الأوتار؟ كانت الإجابة التي تم الاعتراف بها لأول مرة في العام 1984 غريبة وجديرة بالملاحظة، وقد جاء بها الفيزيائيان اليابانيان كيجي كيكّاوا وماسامي ياماساكي.

ولنذكر هنا آخر المراحل الكارثية في تنوعات الانهيار الهائل لعالم خرطوم المياه. وعندما يتقلص نصف قطر البعد الدائري إلى طول بلانك، وطبقاً للنسبية العامة، فإنه سيواصل تقلصه إلى أطوال أقل، غير أن نظرية الأوتار تفرض إعادة تفسير جذرية لما يحدث بالفعل. وتزعم نظرية الأوتار أن جميع العمليات الفيزيائية في عالم خرطوم المياه، حيث نصف قطر البعد الدائري أقصر من طول بلانك ومستمر في النقصان، تتطابق تماماً مع العمليات الفيزيائية التي يكون فيها البعد الدائري أطول من طول بلانك ومستمر في الزيادة! ويعني ذلك أنه عندما يحاول البعد الدائري أن ينهار عبر طول بلانك متجهاً نحو أطوال أصغر، فإن هذه المحاولات لا طائل تحتها من وجهة نظر نظرية الأوتار، الأمر الذي يقلب الهندسة رأساً على عقب. وتبين نظرية الأوتار أن هذا التطور يمكن أن تعاد صياغته - بالضبط يعاد تفسيره - لأنه عندما تتقلص الأبعاد الدائرية إلى طول بلانك تبدأ في التمدد ثانية. وتعيد نظرية الأوتار كتابة قوانين الهندسة للمسافات القصيرة، فما كان يبدو سابقاً أنه انهيار عالمي تام ينظر إليه الآن على أنه ارتداد عالمي. ويمكن أن يتقلص البعد الدائري ليصل إلى طول بلانك. لكن بسبب نمط الالتفاف فإن محاولات التقلص أكثر من ذلك تؤدي في الواقع إلى تمدد. ولنرَ السبب في ذلك.

خامساً: طيف حالات الأوتار(*)

ويعني الاحتمال الجديد لأشكال الأوتار الملتفة أن طاقة الوتر في عالم خرطوم المياه لها مصدران: الحركة الاهتزازية، وطاقة الدوران. وتبعاً لكالوزا وكلاين، يعتمد كل مصدر من هذين المصدرين على هندسة الخرطوم، أي على نصف قطر المعالم الدائري المتجعد، لكن بالتواء وتريّ ملحوظ، حيث أن الجسيمات النقاط لا تستطيع الالتفاف حول الأبعاد. ومهمتنا الأولى هي أن نحدد بالضبط كيف تعتمد مساهمة الدوران والاهتزاز في طاقة الوتر على حجم البعد الدائري. ولهذا الغرض، من المفيد فصل الحركة الاهتزازية للأوتار إلى نوعين:

(*) بعض الأفكار الواردة في هذا المقطع وفي المقاطع القليلة الآتية دقيقة إلى حد ما، ولذا لا تنزعج إذا قابلت صعوبات في تتبع كل حلقة من حلقات تسلسل الشرح - وخاصة إذا قرأت الموضوع مرة واحدة (المؤلف).

الاهتزازات المتجانسة والاهتزازات العادية. وتشير الاهتزازات العادية إلى الذبذبات المعتادة التي سبق أن ناقشناها مراراً مثل تلك الموضحة في الشكل رقم (6-2)؛ أما الاهتزازات المتجانسة فتشير إلى حركة أبسط: الحركة العامة للوتر عندما ينزلق من وضع لآخر من دون التغير في الشكل. وكل حركة الوتر هي مجموع الانزلاق والذبذبة - للاهتزاز المتجانس والعادي - غير أنه في العرض الحالي من الأسهل الفصل بينهما بهذا الشكل. وفي الحقيقة لن تلعب الاهتزازات العادية دوراً محورياً في تعليلاتنا، ولذلك سنأخذ تأثيرها في الاعتبار فقط بعد أن نكون قد انتهينا من شرح لب الموضوع.

سنعرض هنا الملاحظتين الرئيسيتين. الأولى هي: تتناسب عكسياً طاقات الإثارات الاهتزازية المتجانسة للوتر مع نصف قطر البعد الدائري. وهذه نتيجة مباشرة لمبدأ عدم التيقن في ميكانيكا الكم: فنصف القطر الأصغر يتحكم بإحكام أكثر في الوتر، ولذا تزداد كمية الطاقة في حركته من خلال الشعور برهبة الأماكن المغلقة وفقاً لميكانيكا الكم. وهكذا كلما نقص البعد الدائري زادت بالضرورة طاقة حركة الوتر - وهي السمة المميزة للتناسب العكسي. الثانية، وكما وجدنا في المقطع السابق، فإن طاقة اللف تتناسب طردياً - وليس عكسياً - مع نصف القطر. ولنتذكر أن ذلك يعود إلى أن الطول الأدنى للأوتار الملفوفة وبالتالي طاقاتها الدنيا تتناسب مع نصف القطر. وتؤكد هاتان الملاحظتان أن أنصاف الأقطار الكبيرة تعني طاقة دوران كبيرة وطاقة اهتزاز صغيرة، بينما أنصاف الأقطار الصغيرة تعني طاقة دوران أقل وطاقة تذبذب أكبر.

ويؤدي هذا إلى حقيقة أساسية: فأي نصف قطر كبير في عالم خرطوم المياه يقابله نصف قطر صغير له طاقة دوران في العالم الأول مساوية لطاقة الاهتزاز في العالم الثاني، وطاقة اهتزاز في العالم الأول مساوية لطاقة الدوران في العالم الثاني. وحيث أن الخواص الفيزيائية تعتمد على الطاقة الكلية لهيئة الوتر - وليس على كيفية تقسيم الطاقة بين دورانية واهتزازية - فليس هناك أي تمييز فيزيائي بين هذين الشكلين المختلفين هندسياً في عالم خرطوم المياه. وبذلك وللغرابة الشديدة، تدعي نظرية الأوتار أنه لا اختلاف على الإطلاق بين عالم خرطوم المياه "السمين" وعالمه "الرفيع".

إنها مجموعة من الرهانات العالمية قريبة الشبه بما قد تفعله أنت كمستثمر ذكي إذا واجهت هذا الموقف المحير. تصور أنك قد علمت أن أقدار نوعين من الأسهم في بورصة وول ستريت - ولتكن مثلاً أسهم شركة إنتاج أجهزة لياقة وأسهم شركة صمامات القلب - مرتبطة بشكل وثيق. وقد تم الإغلاق اليوم بسعر

دولار واحد للسهم في كل منهما. وقد علمت من مصادر مطلعة أنه إذا زاد سعر سهم أحدهما انخفض الآخر والعكس صحيح. والأكثر من ذلك، وحيث أن مصدرك موثوق به تماماً (لكن قد يسبب ذلك تجاوزات قانونية) - وقد أخبرك أن أسعار الإقفال في اليوم التالي ستكون بالتأكيد متناسبة عكسياً فيما بينها. أي أنه إذا أصبح سعر إقفال أحدهما 2 دولار للسهم، فسيكون الآخر $^{1}/_{2}$ دولار (50 سنت)، وإذا أغلق واحد منهما بسعر 10 دولار للسهم فإن الآخر سيكون $\frac{1}{10}$ (10 سنت) للسهم، وهكذا. لكن الشيء الوحيد الذي لا يستطيع هذا المصدر أن يخبرك به هو أنه لا يعرف أيهما سيرتفع وأيهما سينخفض. فما الذي ستفعله؟

حسناً، ستندفع لاستثمار كل أموالك في البورصة بالتساوي بين الشركتين. كما ستتأكد، من إجراء بعض الحسابات، أن استثماراتك لن تخسر في اليوم التالي. ففي أسوأ الحالات ستبقى أسعار الأسهم كما هي (سيكون سعر الإقفال لكل سهم 1 دولار واحد)، لكن إذا تحرك سعر أي منهما - متفقاً مع معلومات مصدرك الداخلي - سيزيد من دخلك. فمثلاً إذا ارتفع سهم شركة أجهزة اللياقة إلى 4 دولارات وكان سعر إقفال الشركة الأخرى $^{1}/_{4}$ دولار (25 سنت)، فإن القيمة المجموعة لهما هي $4^{1}/_{4}$ دولار (لكل زوج من الأسهم) مقارنة بسعر اليوم السابق وهو دولاران. والأكثر من ذلك، فإنه من منطلق المحصلة النهائية، فلا يعنينا ما إذا كانت أسهم شركة أجهزة اللياقة هي التي ارتفعت وانخفضت أسهم شركة صمامات القلب أو العكس. فإذا كنت تهتم فقط بالمال فإن هذين الظرفين المختلفين لا فرق بينهما من وجهة نظر الربح.

والوضع في نظرية الأوتار يشبه ذلك حيث أن طاقة الأشكال الوترية تأتي من مصدرين - الاهتزاز والدوران - مساهمتهما في الطاقة الكلية للوتر مختلفة بشكل عام. لكن وكما سنرى بتفصيل أكثر، فإن أزواجاً معينة من الظروف الهندسية المتباينة - التي تؤدي إلى طاقة دوران عالية/ طاقة اهتزاز منخفضة، أو طاقة دوران منخفضة/ طاقة اهتزاز عالية - لا يمكن التمييز بينها فيزيائياً. وعلى عكس التشبه بالأمور المالية حيث تختلف الاعتبارات بالنسبة للشركتين فيمكن التمييز بين نوعي أسهمهم إلى جوار المسائل المالية، أما في حالة الأوتار لا يمكن إطلاقاً التمييز بين سيناريوات الأوتار في كل حالة.

وفي الواقع، فإننا سنرى أنه لكي نجعل التشابه مع نظرية الأوتار أكثر دقة، علينا أن نأخذ في اعتبارنا ما سيحدث لو لم توزع نقودك بالتساوي بين الشركتين، فاشتريت مثلاً 1000 سهم من شركة أجهزة اللياقة و3000 سهم من شركة صمامات القلب. وهنا ستعتمد استثماراتك على أي من الشركتين سترتفع أسعار أسهمها عند

الإقفال وأيهما ستنخفض. فمثلاً، إذا كان سعر الإقفال 10 دولار (شركة اللياقة) و10 سنتات (شركة صمامات القلب) فإن استثماراتك الأصلية التي كانت 4000 دولار ستصبح الآن 10300 دولار. أما إذا حدث العكس - سعر الإقفال 10 سنتات (شركة اللياقة) و10 دولار (شركة صمامات القلب) - فستصبح استثماراتك 30100 دولار - أي أكثر بكثير من الحالة السابقة.

إلا أن العلاقة العكسية بين أسعار الإقفال للسهمين تؤكد ما يلي: إذا استثمر صديق لك عكس استثماراتك "بالضبط" - أي 3000 سهم من شركة اللياقة و1000 سهم من شركة صمامات القلب - فإن قيمة رأسماله ستصبح 10300 إذا كان سعر الإقفال في حاله الصمامات عالياً/ واللياقة منخفضاً تماماً مثل استثماراتك في حالة اللياقة عال/ الصمامات منخفض) و30100 إذا كان سعر الإقفال لياقة عال/ صمامات منخفض (ومرة ثانية تساوي استثماراتك في الوضع العكسي). أي أنه من منطلق القيمة الكلية للأسهم فإن التغير المتبادل بين أي الأسهم سيغلق مرتفعاً وأيها منخفضاً يتم تعويضه بالضبط بالتغير المتبادل لعدد الأسهم التي تملكها من كل شركة.

ولنستبق هذه الملاحظات في اعتبارنا عندما نعود للحديث عن نظرية الأوتار وعن طاقات الأوتار المحتملة في حالة معينة. تخيل أن نصف قطر البعد الدائري لخرطوم المياه أكبر عشر مرات من طول بلانك مثلاً. وسنكتب هذا $R = 10$. ويمكن للوتر أن يلتف حول هذا البعد الدائري مرة أو مرتين أو ثلاث مرات وهلم جرا. ويسمى عدد مرات التفاف الوتر حول البعد الدائري "عدد الدوران"، وتتناسب الطاقة الناتجة من الدوران، والتي تعتمد على طول الوتر الملفوف، مع حاصل ضرب نصف القطر في عدد الدوران. وبالإضافة إلى ذلك، وبالنسبة لأي كمية من الدوران، فإن الوتر يستطيع القيام بالحركة الاهتزازية. وبما أن الاهتزازات المتجانسة، موضع تركيزنا الآن، لها طاقات تتناسب عكسياً مع نصف القطر، فإنها تتناسب طردياً مع العدد الصحيح لمضاعفات مقلوب نصف القطر - $\frac{1}{R}$ - الذي هو في هذه الحالة = $\frac{1}{10}$ طول بلانك[2].

---

(2) إذا كنت تتعجب لماذا كانت الطاقة الاهتزازية المتجانسة الممكنة مضاعفات أعداد صحيحة لـ $\frac{1}{R}$، فإن ما تحتاجه هو أن تسترجع المناقشات حول ميكانيكا الكم - موضوع مخزن البضائع بصفة خاصة - في الفصل الرابع. وقد تعلمنا من ذلك أن ميكانيكا الكم تعني أن الطاقة مثل النقود تجيء في فئات محددة: مضاعفات صحيحة لفئات مختلفة من الطاقة. وفي حالة الحركة الاهتزازية المتجانسة للأوتار في عالم خرطوم المياه، فإن هذه الفئات من الطاقة هي بالضبط $\frac{1}{R}$، كما عرضنا في المتن مستخدمين مبدأ عدم التيقن. وهكذا فإن الطاقة الاهتزازية المتجانسة مضاعفات صحيحة لـ $\frac{1}{R}$.

وكما ترى فإن هذا الوضع مشابه إلى حد بعيد لما ذكرناه عن بورصة وول ستريت، حيث أعداد الدوران والاهتزاز مماثلة بشكل مباشر لأسهم الشركتين، حيث R، $\frac{1}{R}$ تشابه أسعار إقفال أسهم الشركتين. والآن وكما أنك تستطيع بسهولة أن تحسب القيمة الكلية لاستثماراتك من أعداد أسهم كل شركة وسعر إقفالها، فإنه يمكن حساب طاقة الوتر الكلية عن طريق عدد الاهتزاز وعدد الدوران ونصف القطر. ونقدم في الجدول رقم (10-1) قائمة جزئية من هذه الطاقات الكلية لأشكال وترية مختلفة، التي نعرفها بأعداد الدوران وأعداد الاهتزاز، في عالم خرطوم المياه ذي نصف القطر R = 10.

والقائمة الكاملة للطاقات ستكون لانهائية الطول حيث أن أعداد الدوران والاهتزاز يمكن أن تتخذ قيماً اختيارية صحيحة، غير أن هذه العينة من القائمة تكفي لنقاشنا. وترى من القائمة ومن ملاحظاتنا أننا في وضع طاقة دوران عالية/ طاقة اهتزاز منخفضة: فطاقة الدوران تأتي من مضاعفات 10، أما طاقة الاهتزاز فتأتي من مضاعفات العدد الأقل $\frac{1}{10}$.

تخيل الآن أن نصف قطر البعد الدوراني يتقلص مثلاً من 10 إلى 2.9 ثم إلى 2.7 وهكذا، إلى أن يصل إلى 4.3 ثم 2.2 ثم 1.1 ثم 7.0 حتى يصل إلى 1.0 $(\frac{1}{10})$. حيث لغرض مناقشتنا الحالية سنتوقف. وفي هذا الشكل الهندسي المتميز في عالم خرطوم المياه، يمكننا أن نجمع جدولاً مشابهاً لطاقات الوتر: ستصبح هنا طاقات الدوران مضاعفات للعدد ، بينما ستصبح طاقات الاهتزاز مضاعفات معكوس هذا العدد أي 10. ويبين الجدول رقم (10-2) هذه النتائج.

ولأول وهلة قد يبدو الجدولان مختلفين. لكن إذا اختبرنا ذلك عن قرب أكثر فسنكتشف أنه على الرغم من الترتيب المختلف، فإن عمود "الطاقة الكلية" في كلا الجدولين له نفس البداية ونفس النهاية. ولإيجاد المدخل المناظر في الجدول رقم (10-2) لأي مدخل نختاره في الجدول رقم (10-1)، فإننا ببساطة نقوم بتبادل أعداد الاهتزاز وأعداد الدوران. أي أن مساهمات الاهتزاز والدوران تلعب دوراً مكملاً من بعضٍ لبعض عندما يتغير نصف قطر البعد الدائري من 10 إلى $\frac{1}{10}$. وهكذا، وبالنسبة لطاقات الأوتار الكلية، فليس هناك تمييز بين الأطوال المختلفة للبعد الدائري. تماماً كما في حالة تبادل لياقة عال/ صمامات منخفض مع صمامات عال/ لياقة منخفض الذي يتم تعويضه بالضبط بالتبادل في عدد الأسهم لكل شركة، فإن تبادل نصف القطر من 10 إلى $\frac{1}{10}$ يتعادل بالضبط بواسطة تبادل أعداد الاهتزاز وأعداد الدوران. والأكثر من ذلك، فلغرض التبسيط قمنا بالتركيز على

القيمة الأصلية لنصف القطر $R = 10$ ومقلوبها = $\frac{1}{10}$، والنتيجة هي نفسها لو كنا قد اخترنا أي نصف قطر ومقلوبه[3].

والجدولان رقما (10-1) و(10-2) ليسا كاملين لسببين: الأول، كما ذكرنا أننا أوردنا عدداً قليلاً فقط من الاحتمالات اللانهائية لأعداد الدوران/ الاهتزاز التي يمكن أن يتخذها الوتر. ولا يسبب ذلك أية مشكلة - ونستطيع أن نجعل هذين الجدولين من الطول بقدر ما نحتمل، وفي النهاية سنجد أن العلاقة بينهما ستظل سارية كما هي. والسبب الثاني، وبخلاف طاقة الدوران فإننا لم نأخذ في اعتبارنا إلا مساهمة الطاقة الناتجة من حركة الاهتزاز المتجانسة للوتر. وعلينا الآن أن ندخل الاهتزازات العادية بالمثل، حيث أن هذه تعطي مساهمات إضافية في طاقة الوتر الكلية وتحدد كذلك شحنات القوى التي تحملها الأوتار. وعلى كل فإن الأمر الهام هو أن هذه الدراسات قد كشفت عن أن هذه المساهمات لا تعتمد على نصف القطر. وبذلك حتى لو ضمنا هذه الصفات الأكثر تفصيلاً للأوتار في الجدولين رقمي (10-1) و(10-2)، فإن الجدولين كانا سيظلان معبرين تماماً، حيث أن المساهمات الاهتزازية العادية تؤثر بنفس القدر تماماً في كل جدول. ولهذا فإننا نستنتج أن كتلة وشحنة الجسيمات في عالم خرطوم المياه ذي نصف القطر R مساوية تماماً لتلك في عالم الخرطوم التي لها نصف القطر $\frac{1}{R}$. وحيث أن هذه الكتل وشحنات القوى تحكم الفيزياء الأساسية، فليس هناك وسيلة للتمييز بين هذين العالمين الهندسيين المتمايزين. ولكل تجربة يمكن القيام بها في أحد العالمين هناك تجربة مناظرة يمكن القيام بها في العالم الثاني مؤدية إلى نفس النتائج بالضبط.

---

(3) ورياضياً، ينشأ التطابق بين طاقات الأوتار في عالم له بعد دائري نصف قطره R أو $\frac{1}{R}$ من حقيقة أن صيغة الطاقة هي $v/R + wR$. حيث v هي عدد الاهتزازات، وw عدد اللفات. وهذه المعادلة ثابتة الكمية في ظروف التبادل اللحظي بين v، w وبالمثل بين R، $\frac{1}{R}$ - أي تحت ظروف تبادل أعداد الاهتزاز والالتفاف ومعكوس نصف القطر. ونحن نتعامل في مناقشاتنا بوحدات بلانك، غير أنه من الممكن استخدام وحدات أكثر ألفة وذلك بإعادة صياغة معادلة الطاقة بمدلول $\sqrt{\alpha'}$ - الذي يعرف بمقياس الأوتار - وقيمته تساوي حوالي طول بلانك 10^{-33} سم. ويمكننا عندئذ أن نعبر عن طاقات الوتر كالآتي $v/_R + {}^{WR}/_{\alpha}$ وهي ثابتة الكمية في ظروف التبادل بين v، w وبالمثل بين R، و $\alpha'/_R$ حيث عبرنا عن القيمتين الأخيرتين بمدلول وحدات مألوفة للمسافات.

الجدول رقم (10-1)

الطاقة الكلية	عدد الدوران	عدد الاهتزاز
$1/10+10=10.1$	1	1
$1/10+20=20.1$	2	1
$1/10+30=30.1$	3	1
$1/10+40=40.1$	4	1
$2/10+10=10.2$	1	2
$2/10+20=20.2$	2	2
$2/10+30=30.2$	3	2
$2/10+40=40.2$	4	2
$3/10+10=10.3$	1	3
$3/10+20=20.3$	2	3
$3/10+30=30.3$	3	3
$3/10+40=40.3$	4	3
$4/10+10=10.4$	1	4
$4/10+20=20.4$	2	4
$4/10+30=30.4$	3	4
$4/10+40=40.4$	4	4

أنماط الاهتزاز والدوران البسيطة لوتر يتحرك في عالم مبين في الشكل رقم (10-3) وله نصف قطر $R=10$. تساهم طاقات الاهتزاز بمضاعفات وطاقات الدوران بمضاعفات 10، مؤدية إلى الطاقة الكلية المبينة. ووحدة الطاقة هي طاقة بلانك، فمثلاً 10.1 في العمود الأخير هي 10.1 مضروبة في طاقة بلانك.

الجدول رقم (10-2)

الطاقة الكلية	عدد الدوران	عدد الاهتزاز
$10+1/10=10.1$	1	1
$10+2/10=10.2$	2	1
$10+3/10=10.3$	3	1

يتبع

تابع

$10+4/10=10.4$	4	1
$20+1/10=20.1$	1	2
$20+2/10=20.2$	2	2
$20+3/10=20.3$	3	2
$20+4/10=20.4$	4	2
$30+1/10=30.1$	1	3
$30+2/10=30.2$	2	3
$30+3/10=30.3$	3	3
$30+4/10=30.4$	4	3
$40+1/10=40.1$	1	4
$40+2/10=40.2$	2	4
$40+3/10=40.3$	3	4
$40+4/10=40.4$	4	4

كما في الجدول رقم (10-1) عدا أن نصف القطر هنا $\frac{1}{10}$.

سادساً: الجدل

عندما أصبح جورج وغريس كائنين مسطحين ذوي بعدين، فإنهما أخذا يعملان أستاذين للفيزياء في كون خرطوم المياه. وبعد أن أسس كل منهما مختبره الذي يتنافس مع مختبر الآخر، أخذ كل منهما يزعم أنه قد تمكن من تحديد البعد الدائري للخرطوم. وللغرابة، وعلى الرغم من السمعة الطيبة لكل منهما في الدقة الكبيرة للأبحاث، إلا أن نتائجهما لم تتفق مع بعض. فيزعم جورج أن نصف قطر البعد الدائري $R=10$ عشرة أضعاف طول بلانك، فيما تزعم غريس أن نصف القطر $R=\frac{1}{10}$ أي عُشر طول بلانك.

يقول جورج مخاطباً غريس: "بناء على حساباتي المبنية على نظرية الأوتار فإني أعلم أن نصف قطر البعد الدائري هو 10، ولذلك يجب أن نتوقع رؤية أوتار ذات الطاقة الواردة في الجدول رقم (10-1). ولقد أجريت العديد من التجارب مستخدماً معجل طاقة بلانك الجديد، وقد كشفت هذه التجارب أن هذه النتيجة قد تأكدت بدقة. ولذا وبكل ثقة فإنني أعلن أن نصف قطر البعد الدائري $R=10$". وقدمت غريس أثناء دفاعها عن نفسها هذه الملاحظات نفسها ما عدا أن نتائجها قد تأكدت بالجدول رقم (10-2) في أن نصف القطر = $R=\frac{1}{10}$.

وفي لمحة سريعة بينت غريس لجورج أن الجدولين في الواقع متناظران على الرغم من الترتيب المختلف لهما. أجاب جورج، المعروف جيداً بأنه أبطأ قليلاً في التفكير من غريس "كيف يكون ذلك؟ فإنني أعلم أن قيم نصف القطر المختلفة تعطي قيماً محتملة مختلفة لطاقات الأوتار وشحنتها من خلال أساسيات ميكانيكا الكم وخواص الأوتار الملفوفة. فإذا اتفقنا على هذا فعلينا أن نتفق على تطابق قيمتي نصف القطر!!".

أجابت غريس مستخدمة وجهة نظرها التي توصلت إليها حديثاً عن فيزياء الأوتار، "إن ما تقوله تقريباً صحيح، لكنه ليس صحيحاً تماماً. وفي العادة، من الصحيح أن قيمتين مختلفتين لنصف القطر تعطيان طاقات مختلفة. ومع ذلك، وفي الظروف الخاصة عندما تكون قيمتا نصف القطر تتناسبان عكسياً مثل 10، $\frac{1}{10}$ - فإن الطاقة والشحنة المسموح بهما في الواقع متناظرات. فما تسميه أنت نمط الدوران أطلق عليه أنا نمط الاهتزاز، وما تطلق أنت عليه نمط الاهتزاز أسميه أنا نمط الدوران. لكن الطبيعة لا تعنيها اللغة التي نستخدمها. وبدلاً من ذلك فإن الفيزياء محكومة بخواص المكونات الأساسية - كتلة الجسيمات (طاقاتها) وشحنات القوى التي تحملها. وبصرف النظر عما إذا كان نصف القطر هو R أو $\frac{1}{R}$، فإن القائمة الكاملة لهذه الخواص بالنسبة للمكونات الأساسية متناظرة في نظرية الأوتار".

وفي لحظة من لحظات الإدراك الجريء، قال جورج: "أظنني قد فهمت. فبالرغم من أن الوصف التفصيلي الذي نستخدمه أنا وأنت للأوتار قد يختلف - ما إذا كانت تدور حول البعد الدائري أو هي نفسها تسلك مسلك الاهتزاز - فإن القائمة الكاملة للخواص التي تكتسبها هذه الأوتار واحدة. ولذا، وحيث أن الخواص الفيزيائية للعالم تعتمد على هذه الخواص للمكونات الأساسية، فإنه لا يمكن التمييز أو التفاضل بين أنصاف الأقطار المتناسبة عكسياً بعضها مع بعض". وكان جورج على صواب.

سابعاً: ثلاثة أسئلة

وهنا يمكن القول، "انظر، إذا كنت أنا كائناً صغيراً في عالم خرطوم المياه، فإنني كنت سأقوم ببساطة بقياس محيط هذا الخرطوم بشريط قياسي، وبالتالي سأحدد نصف القطر بمن من دون أي لبس - وبدون أي مهاترات. فلماذا هذا الهراء عن احتمالين لا يمكن التمييز بينهما لنصفي قطر مختلفين؟ وما هو أكثر من ذلك، ألم تتخل نظرية الأوتار عن الأبعاد الأقل من طول بلانك، فلماذا إذن

نتحدث عن أبعاد دائرية لها أنصاف أقطار تمثل أجزاء من طول بلانك؟ وفي النهاية، وفي مجال الحديث عن الموضوع، فلماذا نهتم بعالم الخرطوم ذي البعدين - وما هي محصلة كل ذلك عندما نتعامل مع كل الأبعاد؟" .

ولنبدأ بالإجابة عن السؤال الأخير، لأن هذه الإجابة ستضطرنا لمواجهة السؤالين الأولين.

وعلى الرغم من أن مناقشاتنا تدور حول عالم خرطوم المياه، إلا أننا قد ألزمنا أنفسنا ببعد فضائي واحد ممتد وآخر فضائي متجعد لمجرد التبسيط. فإذا كنا نتعامل مع ثلاثة أبعاد فضائية وستة أبعاد دائرية - والأخيرة هي أبسط أشكال كالابي - ياو - فإننا سنصل إلى نفس النتيجة. ولكل دائرة نصف قطر، إذا تبادلت الوضع مع معكوسها(*) فإن ذلك سيؤدي إلى عالم فيزيائي متناظر.

ومن الممكن أن نخطو بهذه النتيجة خطوة عملاقة أخرى. فنحن نلاحظ ثلاثة أبعاد فضائية في عالمنا، يمتد كل منها طبقاً للملاحظات الفلكية مسافة تقرب من 15 مليار سنة ضوئية (السنة الضوئية حوالى 6 تريليون ميل - التريليون = مليون مليون، وبذلك فإن هذه المسافة تكون حوالى 90 مليار تريليون ميل). وكما ذكرنا في الفصل 8 ما من شيء ينبئنا ما الذي يوجد وراء ذلك. فنحن لا نعرف ما إذا كانت هذه الأبعاد تتواصل إلى ما لا نهاية أو ربما تتحدب على نفسها في شكل دائرة هائلة تتعدى إمكانيات أحدث التلسكوبات وأكبرها حساسية. فإذا كان الأمر الثاني هو ما يحدث فإن رجل الفضاء المسافر في الفضاء والذي يتجه باستمرار في نفس الاتجاه سيدور حول العالم حتمياً، مثل ما فعل ماجلان في دورانه حول الأرض - وسيعود مرة ثانية إلى نقطة البداية.

ولذا فإن الأبعاد الممتدة المألوفة قد تكون في شكل دوائر وبالتالي ينطبق عليها مفهوم R و $\frac{1}{R}$ في نظرية الأوتار. وللتقريب، وإذا كانت الأبعاد المألوفة دائرية فإن أنصاف أقطارها لا بد أن تكون في طول 15 مليار سنة ضوئية المذكورة أعلاه، والتي هي حوالى عشرة تريليون تريليون تريليون تريليون تريليون ($R = 10^{61}$) مرة طول بلانك، وهي تزداد بتمدد العالم. فإذا كانت نظرية الأوتار صحيحة فإن ذلك مماثل فيزيائياً للأبعاد المألوفة الدائرية ذات أنصاف الأقطار متناهية الصغر، حوالى $\frac{1}{R} = \frac{1}{10^{61}} = 10^{-61}$ مرة طول بلانك! "وهذه هي الأبعاد المألوفة والمعروفة لنا جدياً في وصف بديل جاءت به نظرية الأوتار" . وفي الواقع وبأسلوب معكوس فإن هذه الدوائر الدقيقة تزداد صغراً بمرور الزمن، حيث أنه

(*) R و $\frac{1}{R}$ (المترجم).

كلما زادت R فإن $\frac{1}{R}$ تنكمش. ويبدو الأمر وكأننا قد خرجنا من هذا المأزق العميق. كيف يمكن أن يكون هذا صحيحاً؟ وكيف يدخل إنسان طوله ستة أقدام في مثل هذا العالم المجهري غير المعقول؟ وكيف يمكن لعالم بهذه الضآلة أن يتساوى فيزيائياً مع الامتداد الشاسع الذي نشاهده للسماوات؟ ويقودنا الأمر بعد ذلك بقوة إلى السؤال الثاني من الأسئلة الثلاثة الأصلية: كان من المفروض أن تستبعد نظرية الأوتار المقدرة على اختبار المسافات الأقل من طول بلانك. لكن إذا كان طول نصف قطر البعد الدائري R أكبر من طول بلانك، فإن معكوسه $\frac{1}{R}$ هو بالضرورة كسر من طول بلانك. وعليه ما الذي يجري؟ فالإجابة عن السؤال الأول من هذه الأسئلة الثلاثة سيلقي الضوء على سمة هامة ودقيقة للفضاء والمسافات.

ثامناً: المفاهيم المتشابكة للمسافة في نظرية الأوتار

المسافة مفهوم أساسي في إدراكنا للعالم لدرجة أنه من السهل التقليل من عمق دقتها. ومع التأثير المدهش للنسبية الخاصة والعامة في مفاهيمنا عن الزمان والمكان والسمات الجديدة النابعة من نظرية الأوتار، يقودنا كل ذلك لنكون أكثر حرصاً بشكل ما في تعريفنا للمسافة وأكثر التعريفات أهمية في الفيزياء هي تلك القابلة للتطبيق - أي التعريفات التي تقدم طريقة، على الأقل من ناحية المبدأ، لقياس أي شيء تعرفه. وبعد كل ذلك، وبصرف النظر عن كيفية تجريد المفهوم، فإن التعريف العملي القابل للتطبيق يسمح لنا بتطويع معناه للخطوات التجريبية المستخدمة لقياس قيمته.

كيف نقدم تعريفاً قابلاً للتطبيق عن مفهوم المسافة؟ والإجابة عن هذا السؤال في ضوء نظرية الأوتار مثير للدهشة حقاً ففي العام 1988 أشار الفيزيائيان روبرت براندنبرجر من جامعة براون، وكومرون فافا من جامعة هارفارد، إلى أنه لو كان شكل البعد الفضائي دائرياً، فإن هناك تعريفان للمسافة في نظرية الأوتار مختلفين لكنهما يعتمدان أحدهما على الآخر ويحدد كل منهما طريقة تجريبية محددة لقياس المسافة مبنية على المبدأ البسيط الذي ينص على أنه إذا انتقل مجس بسرعة ثابتة ومعروفة فإننا نستطيع قياس مسافة ما بتعيين الزمن اللازم لقطعها بواسطة المجس. ويتوقف الفرق بين الطريقتين على اختيار المجس المستخدم. فيستخدم التعريف الأول الأوتار غير الملفوفة حول بعد دائري، بينما يستخدم التعريف الثاني أوتاراً ملفوفة. ونرى هنا أن طبيعة امتداد المجس الأساسي مسؤولة عن وجود تعريفين طبيعيين قابلين للاستخدام للمسافة في نظرية الأوتار. أما في نظرية الجسيم النقطة

التي لا تحتوي مفهوماً عن الدوران، فإن هناك تعريفاً واحداً من هذا النوع.

كيف تختلف نتائج كل طريقة؟ كانت الإجابة التي توصل إليها براندنبرجر وفافا مدهشة ودقيقة. ويمكن فهم الفكرة العامة وراء هذه النتائج باللجوء إلى مبدأ عدم التيقن. فالأوتار غير الملفوفة يمكن أن تتحرك بحرية وتختبر كل محيط الدائرة، وهو الطول الذي يتناسب مع R. وتبعاً لمبدأ عدم التيقن فإن طاقات هذه الأوتار تتناسب مع $\frac{1}{R}$ (ولنتذكر العلاقة المعكوسة بين طاقة المجس والمسافة التي يختبرها والمذكورة في الفصل 6). ومن جهة أخرى، فقد رأينا أن الأوتار الملفوفة لها طاقة دنيا تتناسب مع R، وكمجسات للمسافة، فإن مبدأ عدم التيقن ينبئنا بأنها تعتمد على معكوس هذه القيمة، أي $\frac{1}{R}$. ويبين المضمون الرياضي لهذه الفكرة أنه لو استخدمنا كلا منهما لقياس نصف قطر بعد دائري في الفضاء، فإن مجس الوتر غير الملفوف سيقيس R، بينما يقيس الوتر الملفوف $\frac{1}{R}$ حيث أننا نقيس المسافات بمضاعفات طول بلانك كما ذكرنا من قبل. وتدعي نتائج كل تجربة أنها هي نصف القطر - والذي نتعلمه من نظرية الأوتار هو أن استخدام مجسات مختلفة لقياس المسافات يمكن أن يؤدي إلى نتائج مختلفة. وتنطبق هذه الخاصية في الواقع على جميع قياسات الأطوال والمسافات وليس فقط على قياس الأبعاد الدائرية. وتتناسب النتائج التي نحصل عليها من مجسات الأوتار الملفوفة وغير الملفوفة عكسياً مع بعضها مع بعض[4].

---

(4) وقد تتعجب كيف يمكن لوتر مفرود حول بعد دائري نصف قطره R أن يعطي في نفس الوقت نصف قطر قيمته $\frac{1}{R}$. وبالرغم من المنطقية الشاملة لهذا التساؤل، فإن حله يكمن بالفعل في عدم دقة صياغة السؤال نفسه. فعندما نقول إن الوتر ملفوف حول دائرة نصف قطرها R، فإننا بالضرورة نتعامل مع تعريف للمسافة (حتى يصبح للعبارة "نصف قطر R" معنى). لكن هذا التعريف للمسافة صالح فقط لحالة الوتر غير الملفوف - أي، أنماط الاهتزاز. ومن وجهة نظر هذا التعريف للمسافة - وهذا التعريف فقط - فإن هيئة الوتر الملفوف تبدو وكأنها تلتف حول جزء دائري من الفضاء. غير أنه من التعريف الثاني للمسافة، هذا التعريف الذي يعنى بهيئة الوتر الملفوف، فإن الأوتار تتخذ مواقع في الفضاء تماماً مثل أنماط الاهتزاز من وجهة نظر التعريف الأول للمسافة، ونصف القطر الذي "يرونه" هو $\frac{1}{R}$، كما ناقشنا في المتن.

يعطي هذا الوصف شيئاً من المنطق عن سبب العلاقة العكسية لمقاييس المسافة للأوتار الملفوفة وغير الملفوفة. ولأن هذه النقطة دقيقة، فقد يكون من الجدير أن نشير إلى التحليل التقني الذي يتعلق بهذا الموضوع وذلك للقارئ ذي الميول الرياضية. أما في ميكانيكا الكم للجسيمات النقاط العادية، فإن المسافة والعزم (وأساساً الطاقة) يرتبطان عن طريق تحولات فورييه Fourier Transforms. أي أنه وضع حالة إيجن $|\chi>$ على دائرة نصف قطرها R يمكن تعريفها بالمعادلة

$$|\chi>=\sum_{\nu} e^{ixp}|p>$$

حيث $p = v/R$ و $|p>$ هي عزم حالة إيجن (المناظر المباشر لما أطلقنا عليه نمط الاهتزاز المتجانس =

وإذا كانت نظرية الأوتار تصف عالمنا، فلماذا لم نلتق مع هذين الاحتمالين الممكنين عن المسافات في الحياة اليومية أو في المحاولات العلمية؟ وكل مرة نتحدث فيها عن المسافات فإننا نغفل ذلك بطريقة تتمشى مع خبرتنا عن مفهوم واحد للمسافات من دون أدنى إشارة إلى وجود مفهوم ثان. لماذا لم ندرك الاحتمال البديل الآخر؟ والإجابة هي أنه على الرغم من وجود درجة عالية من التناظر في عرضنا للموضوع، فأينما ذكرت R (وبالتالي $\frac{1}{R}$ بالمثل) تختلف بشكل ملحوظ عن القيمة 1 (أي، مرة ثانية طول بلانك مضروباً في 1)، وهكذا فإن واحداً من التعريفين القابلين للتطبيق يثبت أن استخدامه في غاية السهولة. وخلاصة الأمر أننا دائماً نستخدم المنطق الأسهل غير مدركين بالمرة وجود الاحتمال الآخر.

ويرجع التباين في صعوبة المنطلقين إلى الاختلاف البين في كتلة المجسين المستخدمين - طاقة دوران عالية/ طاقة اهتزاز منخفضة والعكس صحيح - فإذا كان نصف القطر R (وبالتالي $\frac{1}{R}$ بالمثل) يختلف بشكل واضح عن طول بلانك (أي أن R=1). وتناظر الطاقة "العالية" لأنصاف الأقطار المختلفة بشكل كبير عن طول بلانك مجسات غاية في الكثافة - مليارات مليارات المرات أثقل من البروتون مثلاً - بينما تناظر الطاقة "المنخفضة" مجسات ذات كتلة تزيد بالكاد عن الصفر. وفي مثل تلك الظروف، هناك اختلاف كبير في الصعوبة بين المنطلقين، حيث أن إنتاج هيئات الأوتار الثقيلة عمل، حتى الآن، أكبر من قدرتنا التقانية. ولذلك فعملياً إن واحداً فقط من هذين المنطلقين هو الممكن إجراؤه تقانياً - وهو الذي يتضمن الأخف من بين نوعي الهيئات الوترية. وهو النوع المستخدم ضمنياً في كل مناقشاتنا حول المسافات حتى الآن، والذي يخاطب حدسنا ويتواءم معه.

= للوتر - الحركة الكلية من دون تغير في الشكل). ومع ذلك، هناك مفهوم ثان لوضع حالة إيجن في نظرية الأوتار $|\bar{\chi}>$ تعرف باستخدام حالات الأوتار الملفوفة:

$$|\bar{\chi}> = \sum_{\omega} e^{i\bar{x}\bar{p}} |\bar{p}>$$

حيث $|\bar{p}>$ حالة إيجن الملتفة ولها $\bar{p} = wR$.

ومن هذه التعريفات نرى مباشرة أن x دورية، ودورتها هي $2\pi R$ بينما $\bar{\chi}$ دورية، ودورتها $2\pi/R$ الأمر الذي يبين أن x هي وضع محاور على دائرة نصف قطرها R بينما $\bar{\chi}$ وضع محاور على دائرة نصف قطرها 1/R. وبشكل أوضح يمكن أن نتمثل الحالتين $|\chi>$، $|\bar{x}>$ حيث يبدآن من نقطة الأصل ونسمح لهما بالزيادة مع الزمن ليقوما بصياغة مفهومنا لتعريف المسافة. أما نصف قطر الدائرة، إذا قيس بأي من المجسين فهو يتناسب طردياً مع الفترة الزمنية المطلوبة للحالة لتعود إلى هيئتها الأصلية. وحيث أن الحالة التي لها الطاقة E تتطور بمعامل طوري يتضمن Et؛ فإننا نرى أن الفترة الزمنية وكذلك نصف القطر هي $t \sim 1/E \sim R$ لأنماط الاهتزاز، و$t \sim 1/E \sim 1/R$ لأنماط الالتفاف.

فإذا نحينا جانباً الناحية العملية في عالم محكوم بنظرية الأوتار، فإننا نكون أحراراً في قياس المسافات مستخدمين أياً من المنطلقين. فعندما يقيس الفلكيون "حجم العالم" فإنهم يفعلون ذلك باختبار الفوتونات التي سافرت عبر الكون والتقطتها تلسكوباتهم. ومن دون لف أو دوران فإن الفوتونات هي النمط "الخفيف" للأوتار في هذه الحالة. والنتيجة التي نحصل عليها أكبر من طول بلانك 10^{61} مرة كما ذكرنا من قبل. فإذا كانت الأبعاد الفضائية الثلاثة المألوفة في الحقيقة دائرية ونظرية الأوتار صحيحة، واستخدم الفلكيون أجهزة جد مختلفة (لا وجود لها في الوقت الحالي)، فمن حيث المبدأ بإمكاننا قياس امتداد السماء بواسطة أنماط أوتار ملفوفة وثقيلة، وسنحصل على نتائج هي معكوس هذه المسافة الهائلة. ومن هذا المنطلق فإننا نتخيل الكون إما أنه هائل كما نراه عادة، أو ضئيل بشكل مزعج. ووفقاً للأنماط الخفيفة للأوتار فإن العالم كبير ومتمدد، وبالنسبة للأنماط الثقيلة فإنه ضئيل ومتقلص. ولا يوجد تناقض هنا، بل على العكس فلدينا تعريفان للمسافات متمايزان لكن لهما نفس المغزى. ونحن نألف التعريف الأول أكثر كثيراً نتيجة للقيود التقانية، لكن، مع ذلك فإن كلاً منهما مفهوم صحيح بنفس الدرجة.

وهنا نستطيع أن نجيب على سؤالنا المبكر حول الأشخاص الكبار في عالم صغير. فعندما نقيس طول شخص ما ونجد أنه ستة أقدام مثلاً، فإننا بالضرورة نكون قد استخدمنا النمط الخفيف للأوتار. ولمقارنة أحجام هؤلاء الأشخاص بحجم الكون فإن علينا أن نستخدم نفس طريقة القياس كما ذكرنا من قبل، الأمر الذي يؤدي إلى حجم أكبر كثيراً من ستة أقدام. والسؤال عن كيفية تواجد مثل هذا الشخص في عالم "دقيق" تم قياسه بواسطة الأنماط الثقيلة للأوتار سؤال غير ذي معنى - وكأنك تقارن التفاح بالبرتقال. وحيث أن لدينا الآن مفهومين للمسافات - باستخدام المجسات الخفيفة أو الثقيلة للأوتار - فإن علينا مقارنة القياسات المأخوذة بنفس الطريقة.

تاسعاً: الحجم الأدنى

لقد كانت رحلة صعبة بشكل ما، لكننا الآن مهيَّؤون لحل المعضلة. فإذا التزم المرء باستخدام "الطريقة السهلة" لقياس المسافات - أي باستخدام أخف أنماط الأوتار بدلاً من الأنماط الثقيلة - فإن النتائج ستكون "دائماً" أكبر من طول بلانك. وكي نرى ذلك، لنتخيل من خلال الانهيار الافتراضي الهائل الأبعاد الممتدة الثلاثة مفترضين أنها دائرية. ولنفرض جدلاً أنه في بداية تجربتنا الذهنية،

كانت أنماط الأوتار غير الملفوفة هي الخفيفة وباستخدامها تحدد للعالم نصف قطر هائل ينكمش بمرور الزمن. وأثناء انكماشها تصبح هذه الأوتار غير الملفوفة أثقل بينما تصبح الأوتار الملفوفة أخف. وعندما ينكمش نصف القطر ليصل إلى طول بلانك - أي عندما تصل R إلى القيمة 1 - يصبح لأنماط الدوران والاهتزاز كتل متقاربة. وتصبح الطريقتان المختلفتان لقياس المسافات على نفس الدرجة من الصعوبة، والأكثر من ذلك، ستؤدي كل منهما إلى نفس النتيجة حيث أن معكوس الرقم 1 يساوي نفسه.

وباستمرار انكماش أنصاف الأقطار، تصبح الأوتار الملفوفة أخف من الأوتار غير الملفوفة، ولذلك، وحيث أننا نميل دائماً نحو "الطريق الأسهل" فإننا يجب أن نستخدمها لقياس المسافات. ووفقاً لهذه الطريقة في القياس، التي تؤدي إلى معكوس القيم المقيسة بالأنماط غير الملفوفة، فإن نصف القطر يكون أكبر من طول بلانك ويتزايد. ويعكس ذلك أن R ببساطة - القيمة المقيسة بواسطة الأوتار غير الملفوفة - تنكمش إلى 1، وتستمر في الانكماش إلى قيم أصغر، وقيمة $\frac{1}{R}$ - الكمية المقيسة بواسطة الأوتار الملفوفة - تكبر إلى قيمة 1 وتستمر في الزيادة. ولهذا، إذا استخدم المرء دائماً أنماط الأوتار الخفيفة - الطريقة "الأسهل" لقياس المسافات - فإن القيمة الدنيا المقيسة ستكون طول بلانك.

وبالتحديد، نكون قد تجنبنا الانهيار الهائل إلى حجم مساوٍ للصفر، لأن نصف قطر الكون المقاس باستخدام مجسات أنماط الأوتار الخفيفة يكون دائماً أكبر من طول بلانك. وبدلاً من الاندفاع في الانهيار نحو طول بلانك ثم إلى أحجام أصغر، فإن نصف القطر - عند قياسه بواسطة أنماط الأوتار الأخف - يتناقص ليصل إلى طول بلانك ثم ينعكس لحظياً لينمو ويستبدل الانهيار بالانفجار.

ويتواءم استخدام أنماط الأوتار الخفيفة لقياس المسافات مع مفهومنا المتفق عليه بالنسبة للطول - الطول الذي كان موجوداً فترة طويلة قبل اكتشاف نظرية الأوتار. وبناءً على هذا المفهوم عن المسافات، كما هو واضح في الفصل الخامس، فإننا قابلنا مشاكل يصعب التغلب عليها مرتبطة بالتأرجحات الكمية العنيفة إذا كان للمسافات الأقصر من طول بلانك أن تلعب دوراً فيزيائياً. ونرى مرة أخرى، أنه من هذا المنظور أمكن تجنب الأطوال فائقة القصر بواسطة نظرية الأوتار. وانطلاقاً من الإطار الفيزيائي للنسبية العامة ومن الإطار الرياضي المقابل لهندسة ريمان، فإن هناك مفهوماً وحيداً للمسافات يمكن أن يتخذ قيماً اختيارية صغرى. أما في الإطار الفيزيائي لنظرية الأوتار، وبالتالي في دنيا النظام الهندسي الكمي المنبثق، هناك مفهومان للمسافات. وبشيء من الحكمة في استخدام كليهما

سنجد أحد مفاهيم المسافة يتلاءم مع كل من حدسنا والنسبية العامة عندما تكون المسافات كبيرة، لكنه يختلف بشكل درامي عندما تصبح المسافات قصيرة، وبصفة خاصة فإن المسافات الأقصر من طول بلانك تصبح غير متاحة.

وحيث أن هذا النقاش دقيق تماماً، فلنعد التأكيد على نقطة محورية. فإذا كان علينا أن نتغاضى عن التمييز بين الطريق "السهل" والطريق "الصعب" في قياس الأطوال، وواصلنا استخدام الأنماط غير الملفوفة كلما انكمشت R مروراً بطول بلانك، فإن الأمر قد يبدو أننا سنصل بالتأكيد إلى مسافات أقل من طول بلانك. غير أن المقطع السابق ينبئنا أن كلمة "مسافة" في الجملة الأخيرة لا بد أن تُفَسَّر بعناية وحيث يمكن أن يكون لها معنيان مختلفان، يتفق واحد منهما فقط مع مفاهيمنا التقليدية. وفي هذه الحالة عندما تنكمش R إلى أطوال أقل من بلانك بينما نمضي في استخدام الأوتار غير الملفوفة (حتى لو أنها أصبحت أثقل من الأوتار الملفوفة)، فإننا بذلك نوظف الطريق "الصعب" في قياس المسافات، وعندئذ فإن معنى "المسافة" هنا لا يتفق مع استخداماتنا القياسية. ومع ذلك فإن المناقشة أبعد كثيراً من مجرد فذلكة لفظية أو حتى راحة لنا أو طريقة عملية للقياس. وحتى لو استخدمنا المفهوم غير القياسي للمسافات، وبناءً عليه وصفنا نصف القطر بأنه أقصر من طول بلانك، فإن الفيزياء التي نتعامل معها - كما شرحنا في المقاطع السابقة - ستكون مماثلة تماماً لفيزياء عالم فيه نصف القطر، بالمفهوم السائد للمسافات، أكبر من طول بلانك (كما اختبرناه مثلاً بالتناظر الدقيق بين الجدول رقم (10-1) والجدول رقم (10-2)). إنها الفيزياء في حقيقة الأمر هي التي تهم وليست اللغة.

وقد استخدم براندنبرجر وفافا وفيزيائيون آخرون هذه الأفكار ليقترحوا إعادة كتابة قوانين علم الكون، الذي فيه لا يتضمن كل من الانفجار الهائل والانهيار الهائل المحتمل عالماً حجمه مساوٍ للصفر، بل عالماً أبعاده لها طول بلانك في جميع الاتجاهات. وهذا الاقتراح مريح بكل تأكيد لتجنب مشاكل كون تنتج من انهياره نقطة لا نهائية الكثافة، أو يبدأ انفجاره منها. ومع أنه من الصعب أن نتخيل بمفهومنا كل العالم وقد انضغط إلى حبة صغيرة في حجم بلانك، فإنه حقيقة أمراً أكثر من الخيال أن نتصور أن العالم ينسحق إلى مجرد نقطة لا حجم لها على الإطلاق. أما علم الكون المبني على الأوتار، كما سنشرح ذلك في الفصل 14، فهو مجال ما زال في مراحله الأولى، لكنه يحمل الأمل بوعود عظيمة، وقد يزودنا بالبديل الأسهل كثيراً في استيعابه بدلاً من نموذج الانفجار الهائل القياسي.

عاشراً: إلى أي مدى يعتبر هذا الاستنتاج عاماً؟

ماذا لو كانت الأبعاد الفضائية ليست دائرية الشكل؟ فهل ستظل هذه الاستنتاجات الجديرة بالاهتمام عن الحد الأدنى للمدى الفضائي في نظرية الأوتار صالحة؟ لا أحد يعرف بالتأكيد. فالسمة الأساسية للأبعاد الدائرية أنها تسمح باحتمال وجود أوتار ملفوفة. وطالما كانت الأبعاد الفضائية ستسمح للأوتار **بالالتفاف** حولها - بصرف النظر عن تفاصيل أشكالها - فإن معظم الاستنتاجات التي توصلنا إليها ستظل صالحة للتطبيق. لكن ماذا سيحدث لو كان اثنين من هذه الأبعاد مثلاً على شكل سطح كروى؟ ففي هذه الحالة لا تقع الأوتار في "مصيدة" الهيئة الملفوفة، لأنها تستطيع دائماً أن "تنزلق" تماماً كما يعود الشريط المطاطي المشدود لشكله الأصلي عن سطح كرة البيسبول. ولكن بالرغم من ذلك، هل تحدد نظرية الأوتار الحجم الذي تستطيع أن تنكمش إليه هذه الأبعاد؟

يبدو أن العديد من الدراسات تبين أن الإجابة تعتمد على ما إذا كان البعد الفضائي الكامل ينكمش (كما في أمثلة الفصل الحالي) أم أن "كتلة" منفصلة من الفضاء هي التي تنهار (كما سنقابل ونشرح في الفصلين 11، و13). ويسود اعتقاد بين منظري نظرية الأوتار أن هناك حجماً أدنى محدد، بصرف النظر عن الشكل، تماماً كما في حالة الأبعاد الدائرية، طالما كان الوضع يتعلق بانكماش الأبعاد الفضائية ككل. والهدف الهام هو ترسيخ هذه التوقعات من أجل الأبحاث القادمة لأن لها تأثيراً مباشراً على عدد من سمات نظرية الأوتار بما في ذلك تطبيقاتها في الكوسمولوجيا (علم الكون).

حادي عشر: تناظر المرآة

قام آينشتاين، مستخدماً النسبية العامة، بتشكيل رابطة بين فيزياء الجاذبية وهندسة الزمكان. ولأول وهلة، فإن نظرية الأوتار تقوي وتوسع الرابطة بين الفيزياء والهندسة، حيث أن خواص الأوتار المتذبذبة - كتلتها وشحنات القوى التي تحملها - تعتمد بشكل كبير على خواص مكونات الفضاء المتجعدة. ومع ذلك فقد شاهدنا حالاً أن الهندسة الكمية - الترافق بين الهندسة والفيزياء في نظرية الأوتار - له بعض الانحناءات المدهشة. ففي النسبية العامة وفي الهندسة "المتفق عليها" تختلف دائرة لها نصف القطر R عن أخرى لها نصف القطر $\frac{1}{R}$، الأمر الواضح والبسيط؛ عدا أنه في نظرية الأوتار لا فرق بينهما فيزيائياً. ويدفعنا هذا إلى أن نكون على جرأة كافية لنذهب أبعد من ذلك ونسأل عما إذا كانت هناك

أشكال هندسية للفضاء تختلف بشكل أكثر جذرية - وليس في مجرد الحجم الكلي فقط، ولكن أيضاً تختلف في الشكل - لكن وبالرغم من كل ذلك فهي فيزيائياً غير قابلة للتمايز فيما بينها في نظرية الأوتار.

في العام 1988، أبدى لانس ديكسون من مركز المعجل الخطي في ستانفورد، ملاحظات قيمة في هذا الخصوص، والتي طورها بعد ذلك وولفغانغ ليرشي من CERN، وفافا من هارفارد، ونيكولاس وارنر من MIT في ذلك الوقت. وتأسيساً على النواحي الجمالية الدفينة في اعتبارات التناظر، قام هؤلاء الفيزيائيون باقتراحاتهم الجريئة حول احتمال أن يكون لشكلين مختلفين من أشكال كالابي - ياو- تم اختيارهما للبعدين المتجعدين الإضافيين- نفس الفيزياء.

ولتكوّن فكرة عن كيف يمكن لاحتمال بعيد كهذا أن يحدث في الواقع، لنسترجع أن عدد الثقوب في أبعاد كالابي - ياو الإضافية تحدد عدد العائلات التي تنضوي تحتها الإثارات الوترية. وتشابه هذه الثقوب تلك الموجودة في الكعكة الدائرية أو أبناء عمومتها متعددي الثقوب الموجودة في الشكل رقم (9-1). وأحد نقائص الصورة ذات البعدين هو أننا مضطرون أن نبين أن الصفحة المطبوعة لا تستطيع إظهار أن لفضاء كالابي - ياو سداسي الأبعاد ثقوباً متنوعة في أبعادها. وبالرغم من أنه من الصعب تصور مثل هذه الثقوب، إلا أنه يمكن وصفها بالرياضيات المفهومة جيداً. والحقيقة الأساسية هنا أن عدد عائلات الجسيمات التي نشأت من اهتزازات الأوتار تعتمد فقط على العدد الكلي للثقوب وليس على عدد ثقوب كل بعد على حدة (ولهذا لا نهتم حول وضع تمايزات بين الأنواع المختلفة للثقوب أثناء مناقشتنا في الفصل التاسع). والآن تخيل اثنين من فراغات كالابي - ياو، التي يختلف فيها عدد الثقوب في الأبعاد المتنوعة، لكن العدد الكلي للثقوب واحد فيها. وحيث أن عدد ثقوب كل بعد ليس متساوياً، فإن شكلي كالابي - ياو مختلفان. ولكن بما أن لهما نفس العدد الكلي للثقوب فإن كلاً منهما سيؤدي إلى عالم له "نفس عدد العائلات". وليس هذا بالطبع إلا إحدى الخواص الفيزيائية. والاتفاق على كل الخواص الفيزيائية هو مطلب أكثر تعجيزاً، لكنه على الأقل يمنح الأمل حول كيفية أن يصبح تخمين ديكسون وليرشي وفافا ووارنر احتمالاً صحيحاً.

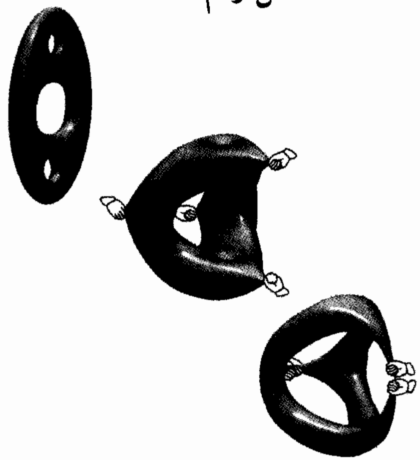
في خريف 1987 التحقت بقسم الفيزياء جامعة هارفارد في زمالة علمية بعد الدكتوراه، وكان مكتبي في نفس الطابق الذي به فافا. وحيث أن رسالتي كانت تركز على الخواص الفيزيائية والرياضية لأبعاد كالابي - ياو المتجعدة في نظرية

الأوتار، فقد أبقاني فافا على دراية بأعماله في هذا المجال. وعندما توقف أمام مكتبي في خريف 1988 وأخبرني بما توصل إليه هو وليرشي ووارنر، أخذت بما سمعت لكن خالجني الشك. كان سبب دهشتي أنني أيقنت أنه لو كانت أفكارهم صحيحة، ستفتح طريقاً جديداً في أبحاث نظرية الأوتار، أما سبب ما خالجني من شك فكان يقيني أن التخمين شيء والخواص المستقرة للنظرية شيء آخر تماماً.

وخلال الشهور التي تلت ذلك، فكرت كثيراً في ما عرضوه، وبصراحة أصبحت شبه مقتنع بأنه ليس صحيحاً. غير أنه، ولدهشتي، وأثناء إجرائي لبحث - لا علاقة له فيما يبدو بهذا الموضوع - بالتعاون مع رونين بليسير الذي كان وقتها طالب دراسات عليا بجامعة هارفارد، والآن عضو هيئة تدريس بمعهد وايزمان وجامعة ديوك، سرعان ما تغير رأيي تماماً. فقد أصبحنا أنا وبليسير مهتمين بتطوير الطرق التي نبدأ فيها بأحد أشكال كالابي - ياو الأصلية، ونناور بها رياضياً لنحصل على أشكال غير معروفة لكالابي - ياو حتى الآن. وكنا بالتحديد مندفعين تجاه تقنية تعرف باسم أوربيفولدنغ (Orbifolding)، التي كان رائدها ديكسون وجيفري هارفي من جامعة شيكاغو، وفافا وويتن في منتصف ثمانينيات القرن العشرين. وفي هذه الطريقة تلتصق النقاط المختلفة على الشكل الأصلي لكالابي - ياو معاً وفقاً لقواعد رياضية تؤكد تكون أشكال جديدة لكالابي - ياو. وقد أوضحنا ذلك في رسم تخطيطي في الشكل رقم (10-4). والرياضيات التي تعمل بها المناورات الموضحة في الشكل رقم (10-4) معقدة، ولهذا السبب فإن منظري نظرية الأوتار قد درسوا بالتفصيل هذه الطريقة فقط في حالة تطبيقها على الأشكال البسيطة - أي على الاحتمالات المتنوعة ذات الأبعاد الأكثر في أشكال الكعكات (الدونت) الموضحة في الشكل رقم (9-1). إلا أننا أنا وبليسير قد أدركنا أن بعض الأفكار الجديدة والجميلة لدورون جيبنر، الذي كان في جامعة برنستون في ذلك الوقت، قد نقدم إطاراً نظرياً قوياً لتطبيق تقنية أوربيفولدنغ على أشكال كالابي - ياو الكاملة مثل تلك الموجودة في الشكل رقم (8-9).

وبعد بضعة أشهر من السعي المكثف وراء تلك الأفكار توصلنا إلى نتيجة مدهشة. فلو قمنا بلصق مجموعات معينة من النقاط بعضها مع بعض بالشكل الصحيح فإن أشكال كالابي ياو التي ستنتج من ذلك ستختلف بشكل مذهل عن الشكل الذي بدأنا به: أعداد الثقوب ذات الأبعاد الفردية في أشكال كالابي - ياو الجديدة تساوي أعداد الثقوب ذات الأبعاد الزوجية في الأشكال الأصلية، والعكس صحيح. وبالتحديد فإن ذلك يعني أن العدد الكلي للثقوب - وبالتالي عدد عائلات الجسيمات - في كل حالة هو نفسه على الرغم من أن تبادل الأعداد

الشكل رقم (10-4)



أوربيفولدغ Orbifolding، طريقة تنتج منها أشكال جديدة لكالابي - ياو بالتصاق النقاط المختلفة بعضها مع بعض على أحد أشكال كالابي - ياو الأصلية.

الفردية والزوجية يعني أن أشكالها وبنيتها الهندسية الأساسية مختلفة تماماً[5].

وعندما أثارنا التقارب الواضح مع أفكار ديكسون - ليرشي - فافا - وارنر، بدأنا أنا وبليسير التفكير الجدي في السؤال المحوري: بجانب عدد من عائلات الجسيمات، هل يتفق شكلا كالابي - ياو المختلفان فى بقية الخواص الفيزيائية؟ وبعد بضعة أشهر من التحليلات الرياضية التفصيلية والمعقدة، التي كنا أثناءها قد تلقينا تشجيعاً وتعضيداً من غراهام روس، المشرف على رسالتي في جامعة أوكسفورد، ومن فافا، تمكنا أنا وبليسير من أن نؤكد أن الإجابة عن هذا السؤال هي نعم، بكل تأكيد. ولأسباب رياضية تتعلق بالتبادل الزوجي - الفردي، قمنا أنا

(5) بالنسبة للقارئ ذي الميول الرياضية، نشير إلى أنه بدقة أكبر فإن عدد عائلات اهتزاز الأوتار هو نصف القيمة المطلقة لخاصية يولر لفراغ كالابي-ياو، كما سبق أن ذكرنا في الهامش رقم (16) في الفصل التاسع. وتتحدد بواسطة القيمة المطلقة للفرق بين $h^{2,1}$، و$h^{1,1}$، حيث $h^{p,q}$ تشير إلى (p,q) عدد هودج. وإذا تحولنا إلى التعبير عددياً، فإن ذلك يعني عدد الدورات الثلاثية غير العادية المتناظرة ("ثقوب ثلاثية الأبعاد) وعدد الدورات الثنائية المتناظرة ("ثقوب ثنائية الأبعاد"). وهكذا بينما يدور الحديث عن العدد الكلي للثقوب في متن الكتاب، فإن التحليل الأكثر دقة يبين أن عدد العائلات يعتمد على القيمة المطلقة للفرق بين الأبعاد الفردية والأبعاد الزوجية للثقوب. ومع ذلك فإن النتيجة واحدة. فعلى سبيل المثال، إذا اختلف شكلان من أشكال كالابي-ياو عن طريق تبادل $h^{2,1}$، $h^{1,1}$ أعداد هودج، فإن عدد عائلات الجسيمات - والعدد الكلي "للثقوب" - لن يتغير.

وبليسير بصك المصطلح "ثنيات المرآة" لنصف فراغات كالابي - ياو المختلفة هندسيا لكنها متكافئة فيزيائياً[6]. والفراغات المنفردة في ازدواجات المرآة لأشكال كالابي - ياو ليست حرفياً صور مرآة من بعضها البعض بالمعنى الذي نستخدمه في حياتنا اليومية. وحتى مع أن لها صفات هندسية مختلفة إلا أنها تنتج نفس الكون الفيزيائي عند استخدامها في الأبعاد الإضافية في نظرية الأوتار.

كانت الأسابيع التي تلت حصولنا على تلك النتائج وقتاً عصيباً للغاية. وقد أدركنا أنا وبليسير أننا بصدد أن نضع أيدينا على أمر هام جديد في فيزياء الأوتار. فقد بينا أن الترافق الوثيق بين الهندسة والفيزياء الذي وضعه في الأساس آينشتاين قد تم تطويره جذرياً بواسطة نظرية الأوتار: فالأشكال الهندسية المختلفة جذرياً والتي تعني خواص فيزيائية مختلفة في النسبية العامة تعطي في نظرية الأوتار فيزياء واحدة متناظرة. لكن ماذا لو كنا على خطأ؟ وماذا لو كانت تضميناتها الفيزيائية تختلف في بعض الأمور الدقيقة التي أغفلناها؟ فمثلاً عندما عرضنا نتائجنا على ياو، أعلن بأدب لكن في حزم أننا لا بد أن نكون قد ارتكبنا خطأ ما، وجزم بأنه من وجهة النظر الرياضية فإن نتائجنا على درجة من الغرابة تجعلها غير صحيحة. وقد دفعنا تقويمه للتوقف والتفكير بشكل جدي. وأن ترتكب خطأ في موضوع بسيط وصغير فلن يسترعي ذلك إلا قليلاً من الاهتمام. غير أن نتائجنا تقدم خطوة غير متوقعة في اتجاه جديد والذي سيحدث بكل تأكيد رد فعل قوي. فلو كنا على خطأ فسيعلم الجميع بذلك.

وأخيراً، وبعد فحص وتمحيص متكررين ازدادت ثقتنا في نتائجنا، وقمنا بإرسال البحث للنشر. وبعد أيام قليلة، وأثناء وجودي بمكتبي في جامعة هارفارد دق جرس التليفون. كان فيليب كانديلاس من جامعة تكساس على الطرف الآخر، وكان أول سؤال بادرني به هو ما إذا كنت جالساً في مقعدي. أجل كنت جالساً. عندها أخبرني أنه واثنين من تلاميذه، مونيكا لينكر ورولف شيمريغ قد توصلوا إلى أمر سيطيحني من مقعدي. وقد وجدوا بالفحص الدقيق لعينة كبيرة لمجموعة من أشكال كالابي - ياو التي حصلوا عليها بواسطة الكمبيوتر، أنه على الأغلب قد جاءت جميعها في أزواج متقابلة بتبادل الثقوب الفردية والزوجية. أخبرته أنني ما زلت جالساً في مقعدي - وأنني وبليسير قد توصلنا لنفس النتيجة. واتضح أن أبحاث كانديلاس مكملة لأبحاثنا؛ وقد ذهبنا خطوة أبعد بأن بينا أن كل الفيزياء

(6) جاء هذا الاسم من أن "ماسات هودج" - ملخص رياضي للثقوب متنوعة الأبعاد في فراغ كالابي-ياو - انعكاسات صورة مرآة لكل فراغ من فراغات كالابي-ياو.

الناتجة التي تأتي في أزواج مرآة كانت واحدة، بينما كان كانديلاس وتلامذته قد اظهروا أن عينة كبيرة بشكل ملحوظ من أشكال كالابي - ياو تأتي في أزواج مرآة. ومن خلال هذين البحثين اكتشفنا تناظر المرآة في نظرية الأوتار(7).

ثاني عشر: فيزياء ورياضيات تناظر المرآة

يمثل تيسير الارتباط القوي والفريد - وفقاً لآينشتاين - بين هندسة الفراغ والفيزياء المرئية واحداً من التحولات الصارخة الناتجة من نظرية الأوتار. غير أن هذه التطورات تضم ما هو أكثر كثيراً من مجرد موقف فلسفي. فتناظر المرآة بالتحديد، يقدم وسيلة قوية لفهم كل من فيزياء نظرية الأوتار ورياضيات فراغات كالابي - ياو.

كان علماء الرياضيات المشتغلون في مجال الهندسة الجبرية يدرسون فراغات كالابي - ياو لأسباب رياضية بحتة، وذلك قبل اكتشاف نظرية الأوتار بزمن طويل. وقد توصلوا إلى الكثير من الخواص التفصيلية لهذه الفراغات الهندسية بدون ظهور أي ملمح عن التطبيقات الفيزيائية في المستقبل. وقد اتضح أن سمات معينة لفراغات كالابي - ياو صعبة - وفي الأساس مستحيلة - بالنسبة للكشف عنها كلياً بَواسطة الرياضيين. لكن اكتشاف تناظر المرآة في نظرية الأوتار قد غير من ذلك بشكل واضح. وملخص القول أن تناظر المرآة يعني أن أزواجاً معينة من فراغات كالابي - ياو، تلك الأزواج التي كان يعتقد أنها غير مرتبطة بعضها ببعض تماماً، أصبحت الآن مرتبطة بشكل وثيق بواسطة نظرية الأوتار. وهي مرتبطة بواسطة العالم الفيزيائي العام الذي تتضمنه كل منها إذا كانت أي منها هي التي تم اختيارها لتكون البعد الإضافي المتجعد. ويقدم هذا الارتباط المتشابك غير المتوقع في السابق، وسيلة فيزيائية ورياضية جديدة وقاطعة.

تخيل مثلاً أنك مشغول بحساب الخواص الفيزيائية - كتلة الجسيمات وشحنات القوى - المرتبطة بأحد اختيارات كالابي - ياو المحتملة للأبعاد الإضافية. ولست معنياً بصفة خاصة بالتوافق بين النتائج التفصيلية والتجربة، حيث أننا قد رأينا أن هناك عدداً من العقبات النظرية والتقنية تجعل من هذا أمراً في غاية الصعوبة في الوقت الحالي. وبدلاً من ذلك فإنك تعمل من خلال تجربة ذهنية

(7) يستخدم كذلك المصطلح "تناظر المرآة" في مضمون آخر مختلف تماماً في الفيزياء مثل حالة الكفيّة (الكيرالية) - أي ما إذا كان الكون متناظراً يمين-يسار - كما سبق أن ناقشنا في الهامش رقم (7)، في الفصل 8.

تتعلق بما قد يكون عليه الكون إذا تم اختيار شكل معين من أشكال كالابي - ياو. ولفترة يبدو أن كل شيء يسير على ما يرام، لكن وفي خضم أبحاثك تقابلك صعوبات في الحسابات الرياضية لا يمكن التغلب عليها. ولا يستطيع أحد أن يحلها حتى ولو كان من أعظم الخبراء الرياضيين في الكون. لقد أصبحت في مأزق. لكن عندئذ أدركت أن لهذا الشكل من أشكال كالابي - ياو رفيق صورة مرآة. وبما أن نتائج فيزياء الأوتار المتعلقة بكل عضو من ازدواج صورة المرآة متناظرة، فإنك ستقر بأنك حر في اختيار أي منهما لإجراء حساباتك. وهكذا ستعيد إجراء الحسابات الصعبة على فراغ كالابي - ياو الأصلي مستخدماً صورة المرآة الأخرى، متأكداً من أن نتائج الحسابات - أي الفيزياء - ستكون هي نفسها. ومن النظرة الأولى قد تظن أن الصورة المعدلة للحسابات ستكون في مثل صعوبة الحسابات الأصلية. لكنك ستقف على مفاجأة قوية وسارة: ستكتشف أنه بالرغم من أن النتيجة واحدة إلا أن الصيغة التفصيلية للحسابات مختلفة تماماً، بل وفي بعض الأحيان تتحول الحسابات المعقدة الفظيعة إلى حسابات غاية في السهولة على صورة المرآة لفراغ كالابي - ياو. ولا يوجد تفسير بسيط لحدوث ذلك، لكن - على الأقل بالنسبة لحسابات معينة - ذلك يحدث بكل تأكيد، بل ويمكن أن تكون درجة الصعوبة التي أصبحت عليها الحسابات قد تناقصت بشكل حاد. والمغزى هنا واضح بالطبع: فأنت لست بعد في مأزق.

ويشبه ذلك - بشكل ما - إذا طلب أحدهم منك أن تحصي بالضبط عدد البرتقالات الموجودة عفوياً في سلة عملاقة طول ضلعها 50 قدماً وعمقها 10 أقدام. ستبدأ في إحصاء البرتقال واحدة واحدة، وسرعان ما ستدرك أن هذا العمل مضنٍ جداً. ولحسن حظك يجيئك صديق كان موجوداً عند تسليم البرتقال. يخبرك هذا الصديق أن البرتقال قد وصل معبأ في صناديق صغيرة بعناية (تصادف أنه كان يمسك بأحدها) وأن هذه الصناديق عندما رصت كانت بطول عشرين صندوقاً وعرض عشرين صندوقاً وارتفاع عشرين صندوقاً وهكذا ستحسب بسهولة أن البرتقال قد جاء معبأ في 8000 صندوق، وأن كل ما تحتاج إليه هو معرفة كم برتقالة في الصندوق الواحد. وستفعل ذلك بسهولة بأن تأخذ الصندوق من صديقك، ثم تملأه بالبرتقال، الأمر الذي ينهي مهمتك الرهيبة في إحصاء البرتقال من دون أي مجهود يذكر. وخلاصة القول أنك بإعادة تنظيم حساباتك بمهارة تمكنت من إنجاز مهمتك بسهولة محسوسة.

والوضع بالنسبة لحسابات عديدة في نظرية الأوتار هو نفسه. ومن منظور أحد أشكال كالابي - ياو قد تتضمن الحسابات عدداً لا حصر له من الخطوات

الرياضية الصعبة. ومع ذلك، وبنقل الحسابات إلى صورة المرآة فإن إعادة الترتيب بطريقة أكثر كفاءة بكثير تسمح بإنهائها بسهولة نسبية. وقد قمنا أنا وبليسير بهذه الخطوة التي طبقت عمليات بشكل مثير للانتباه بواسطة كانديلاس ومعاونيه زينيا دي لا أوسا وليندا باركيز من جامعة تكساس، وبواسطة بول غرين من جامعة ماريلاند. وقد أثبتوا أنه يمكن إتمام حسابات على درجة لا يمكن تخيلها من الصعوبة باستخدام منظور صورة المرآة، بقليل من الجبر والحاسب الشخصي.

كان هذا التطور مثيراً وخاصة بالنسبة لعلماء الرياضيات، لأن بعض هذه الحسابات كانت هي بالضبط التي عكفوا عليها سنين طويلة من دون الوصول إلى حل. فنظرية الأوتار - أو هكذا يزعم الفيزيائيون - قد سبقتهم في الوصول إلى الحل.

والآن لا بد أن نأخذ في الاعتبار أن هناك عموماً تنافساً جيداً وصحياً بين علماء الرياضيات وعلماء الفيزياء. وقد تصادف أن كان هناك عالما رياضيات من النروج - جير إيلينغسرود وشتاين أريلد ستروم يجريان أحد الحسابات العديدة التي تغلب عليها بنجاح كانديلاس ومعاونوه باستخدام تناظر المرآة. وباختصار توصلت حساباتهما إلى إحصاء عدد الكرات التي يمكن "رصها" داخل فراغ معين لكالابي - ياو، بطريقة مشابهة إلى حد ما لطريقة إحصاء البرتقال في السلة العملاقة. وفي مؤتمر للفيزيائيين والرياضيين في بيركلي 1991، أعلن كانديلاس النتائج التي توصل إليها هو ومجموعته باستخدام نظرية الأوتار وتناظر المرآة، وهي: 317،206،375. بينما أعلن إيلينغسرود وستروم نتائج حساباتهما الرياضية التي في غاية التعقيد وهي: 2،682،549،425. وتجادل الرياضيون والفيزيائيون لعدة أيام: فمن منهم على صواب؟ تحول السؤال إلى اختبار حقيقي للمصداقية الكمية لنظرية الأوتار، حتى أن بعض الناس قد علق - على شكل دعابة - أن هذا الاختبار هو البديل (أو أقرب شيء) لمقارنة نظرية الأوتار مع التجربة. والأكثر من ذلك فإن نتائج كانديلاس قد تخطت النتيجة العددية الوحيدة التي زعم إيلينغسرود وستروم أنهما توصلا إليها. وقد زعم كانديلاس ومعاونوه أنهم قد أجابوا عن أسئلة كثيرة أخرى كانت أكثر صعوبة بمراحل - كانت في الحقيقة صعبة لدرجة أن الرياضيين لم يحاولوا أبداً الاقتراب منها. ولكن هل يمكن أن نثق في نتائج نظرية الأوتار؟ انتهى الاجتماع بتبادل مثمر للأفكار بين الرياضيين والفيزيائيين، لكن من دون حل للتناقض.

وبعد شهر من ذلك، وصلت رسالة بالبريد الإلكتروني لجميع المشاركين في مؤتمر بيركلي معنونة "الفيزياء تنتصر!"، فلقد اكتشف إيلينغسرود وستروم خطأ

في شفرة الكمبيوتر، وعند تصحيحها تأكدت نتائج كانديلاس. ومنذ ذلك الحين أجريت العديد من المراجعات الرياضية على المصداقية الكمية لتناظر المرآة في نظرية الأوتار: لقد نجحت بسهولة بدرجة امتياز. وحديثاً جداً وبعد ما يقرب من عقد من الزمان بعد اكتشاف تناظر المرآة بواسطة الفيزيائيين، أنجز الرياضيون تقدماً عظيماً في الكشف عن الأسس الرياضية المتأصلة في هذه الحسابات. وبالاستفادة من المساهمات المحسوسة لعلماء الرياضة مكسيم كونتسيفيش ويوري مانين وغانغ تيان وجون لي وألكسندر جيفينتال، وجد ياو ومعاونوه بونغ ليان وكيفنغ ليو في النهاية برهاناً رياضياً عظيماً على صحة المعادلات المستخدمة لإحصاء الكرات في فراغات كالابي - ياو، وبذلك يكونون قد توصلوا لحل المشكلات التي حيرت الرياضيين لمئات السنين.

وإلى جانب اعتبارات هذا النجاح، فإن ما ألقت عليه الضوء هذه التطورات هو الدور الذي بدأت تلعبه الفيزياء في الرياضيات الحديثة. دأب الفيزيائيون لفترة طويلة على "التنقيب" في أرشيف الرياضيين بحثاً عن وسائل لبناء وتحليل نماذج للعالم الفيزيائي. أما الآن ومن خلال اكتشاف نظرية الأوتار بدأت الفيزياء في رد الدَّين وتقديم وسائل ذات مقدرة عالية للرياضيين لحل مشكلاتهم المتعثرة. ولا تقدم نظرية الأوتار إطاراً موحداً للفيزياء فقط، بل إنها من الممكن أن تقيم اتحاداً عميقاً بنفس الدرجة مع علم الرياضيات كذلك.

الفصل الحادي عشر

تمزيق نسيج الفضاء

إذا شددت غشاءً من المطاط بقوة فعاجلاً أو آجلاً سيتمزق. وقد أوحت هذه الحقيقة البسيطة للعديد من الفيزيائيين على مر السنين أن يتساءلوا ما إذا كان من الممكن أن يحدث نفس الشيء للنسيج الفضائي المصنوع منه الكون. أي أنه، هل من الممكن أن يتمزق النسيج الفضائي إرباً، أم أن هذه مجرد فكرة خادعة نشأت عن اتخاذ مثال غشاء المطاط بجدية أكثر من اللازم؟

تجيب النسبية العامة لآينشتاين على هذا التساؤل بلا، فالنسيج الفضائي لا يمكن أن يتمزق[1]. فمعادلات النسبية العامة تمد جذورها بقوة في هندسة ريمان، وكما أشرنا في الفصل السابق، فإن هذا إطار يتناول الاضطراب في علاقات المسافات بين المواقع في الفضاء. وحتى يصبح الكلام ذا معنى حول هذه العلاقة بين المسافات، فإن الصياغة الرياضية تتطلب أن يكون نسيج الفضاء "ناعماً" - وهو مصطلح له معنى تقني رياضي، لكن استخداماته اليومية تشكل خلاصته: لا تجعدات ولا ثقوب ولا قطع منفصلة "ملتصقة" بعضها ببعض ولا تمزقات. فإذا كان لنسيج الفضاء مثل هذه الصفات غير المنتظمة، فإن معادلات النسبية العامة كانت ستفشل تماماً، مشيرة إلى بعض الكوارث الكونية المختلفة - وستحدث نتيجة كارثية، يبدو أن عالمنا حسن السلوك قد تجنبها.

ولم يمنع ذلك النظريين ذوي الخيال الواسع على مدار السنين من التفكير ملياً في احتمال وجود صياغة جديدة للفيزياء تتخطى نظرية آينشتاين الكلاسيكية، وتتضمن فيزياء الكم بحيث يمكن أن تبين حدوث قطع وتمزيق ودمج للنسيج الفضائي. وفي الحقيقة، إن إدراك أن فيزياء الكم تؤدي إلى تموجات عنيفة على المسافات القصيرة، أدى إلى جعل البعض يفترضون أن التمزق صفة مجهرية

(1) سيرى القارئ ذو الميول الرياضية، إذا كنا نتساءل ما إذا كانت طوبولوجية الفضاء ديناميكية - أي أنها تتغير. ونلاحظ انه على الرغم من استخدامنا بكثرة للتعبير التغير الطوبولوجي الديناميكي، فإننا عملياً نعني دائماً عائلة أحادية المؤشر للزمكان الذي تتغير فيه الطوبولوجيا كدالة من هذا المؤشر. وتقنياً فإن هذا المؤشر ليس هو الزمن، لكن في حدود معينة، يمكن في الأساس تعريفه بمدلول الزمن.

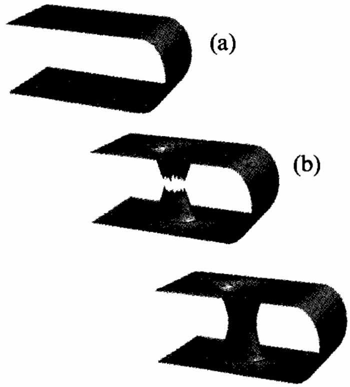
شائعة في نسيج الفضاء. ويستغل مفهوم ثقب الدودة هذه المقولة الخاطئة (مفهوم معروف بين المغرمين بأفلام الخيال العلمي (Star Trek Deep Space Nine) والفكرة هنا بسيطة: تخيل أنك رئيس مجلس إدارة شركة كبرى مقرها بالطابق التسعين بأحد برجي مركز التجارة العالمية في نيويورك(*). ويوجد في البرج الآخر في الطابق التسعين أيضا فرع من فروع الشركة يستلزم الأمر الاتصال به بصورة مستمرة. وحيث أنه ليس عملياً أن ينتقل أحد المكتبين إلى مكان الآخر، فقد توصلت إلى اقتراح معقول، وهو بناء جسر بين المكتبين يصل بين البرجين، الأمر الذي يمكن العاملين من التحرك بحرية بين المكتبين من دون أن يقطعوا صعوداً وهبوطاً تسعين طابقاً.

ويلعب ثقب الدودة نفس الدور: فهو جسر أو نفق يختصر المسافة ويصل بين منطقتين في الكون. ولتتخيل عالماً على الشكل الموجود في الشكل رقم (1-11) مستخدما نموذجاً ذا بعدين. فإذا كان مقر شركتك يقع بالقرب من الدائرة السفلى في الشكل رقم (1-11)، (a) فإنك من الممكن أن تصل إلى المكتب الفرعي الذي يقع بالقرب من الدائرة العليا فقط بأن تقطع كل الطريق الذي على شكل الحرف U. لكن إذا كان في استطاعة نسيج الفضاء أن يتمزق مكوناً ثقوباً كما في الشكل رقم (1-11)، (b)، وأن هذه الثقوب يمكن أن تنمو على الشكل مجسات لتندمج معاً كما في الشكل رقم (1-11)، (c)، فسيصل جسر فضائي بين الموقعين اللذين كانا منفصلين. وهذا هو الثقب الدودي. وعليك أن تتذكر أن هناك تشابهاً بين هذا الثقب الدودي وجسر مركز التجارة العالمي، لكنْ هناك فرق أساسي: فجسر مركز التجارة العالمي سيقطع منطقة من الفراغ الموجود - الفراغ بين البرجين. وعلى النقيض، فإن الثقب الدودي يكوِّن منطقة جديدة في الفراغ، حيث أن الفراغ المحدب ذا البعدين في الشكل رقم (1-11)، (a) هو كل ما هناك (في المحاكاة ذات البعدين). أما المناطق التي تقع خارج الغشاء فإنها تبين عدم تطابق هذا التصور الذي يمثل عالم الحرف U وكأنه جسم داخل عالمنا ذي الأبعاد الأكثر. ويخلق الثقب الدودي فضاء جديداً، ومن ثم يتألق بمنطقة فضائية جديدة.

هل توجد فعلاً ثقوب دودية في العالم؟ لا يعرف أحد. وإن وجدت، فهي بعيدة كل البعد عن الوضوح، فليس من المعروف ما إذا كانت شكلاً مجهرياً فقط أم أنها ستغطي مناطق شاسعة من الكون (كما في Deep Space Nine). لكن

(*) المبنى لم يعد له وجود الآن بعد أحداث 11 سبتمبر (المترجم والمراجع).

الشكل رقم (11-1)



(a) في عالم على الشكل حرف U فإن الطريقة الوحيدة للانتقال من طرف إلى الطرف الآخر هو أن تقطع طول كل الكون. (b) يتمزق نسيج الكون ويبدأ طرفا ثقب دودي في النمو. (c) يندمج طرفا الثقب الدودي مكونين جسراً جديداً - وصلة تختصر المسافة - بين طرفي الكون.

العنصر الأساسي في تحديد ما إذا كانت حقيقة أم خيالاً هو تحديد ما إذا كان نسيج الفضاء يتمزق أم لا.

وتقدم الثقوب السوداء مثالاً صارخاً آخر يتمدد فيه نسيج الفضاء حتى آخر مداه. وقد رأينا في الشكل رقم (3-7) أن مجال الجاذبية الهائل لثقب أسود يؤدي إلى تحدب أقصى، الأمر الذي يتسبب في ظهور النسيج الفضائي، وقد أصابته انبعاجات ونتوءات عند مركز الثقب الأسود. وعلى عكس حالة الثقب الدودي، فإن هناك دليلاً تجريبياً قوياً يعضد وجود الثقوب السوداء، ولذا فإن السؤال عما يحدث فعلاً في النقطة المركزية للثقب الأسود هو سؤال علمي وليس مجرد تخمينات. ومرة أخرى، تفشل معادلات النسبية العامة تحت مثل هذه الظروف. وقد اقترح بعض الفيزيائيين وجود ثقوب بالفعل، لكننا محميون من هذه الأمور الكونية "المتفردة" بواسطة أفق الحدث للثقب الأسود، الذي يحجب أي شيء من الهروب من قبضة جاذبيته. وقد قاد هذا المنطق روجر بنروز من جامعة أوكسفورد ليفكر في "فرض رقابة كونية" تسمح بحدوث مثل عدم الانتظام الفضائي هذا فقط إذا كانت محجوبة تماماً عن أعيننا خلف حجاب أفق الحدث. ومن جهة أخرى، وقبل اكتشاف نظرية الأوتار، ظن بعض الفيزيائيين أن المزج الملائم بين ميكانيكا الكم والنسبية العامة يمكن أن يظهر أن ثقوب الفضاء الظاهرية

قد تمت معالجتها - "حياكتها" - بواسطة الاعتبارات الكمية.

وباكتشاف نظرية الأوتار والدمج المتجانس لميكانيكا الكم والجاذبية، فإننا في وضع يسمح بدراسة هذه الموضوعات. حيث أن منظري نظرية الأوتار لم يتمكنوا من الإجابة بعد كلية عن هذه الموضوعات، غير أنهم استطاعوا خلال السنوات القليلة الماضية حل موضوعات أخرى قريبة جداً منها. وفي هذا الفصل سنناقش كيف أظهرت نظرية الأوتار، للمرة الأولى، وبصورة مؤكدة أن هناك ظروفاً فيزيائية تختلف عن الثقوب الدودية والثقوب السوداء في أمور معينة يمكن في وجودها أن يتمزق نسيج الفضاء.

أولاً: الاحتمال الذي يعذب بالإغواء

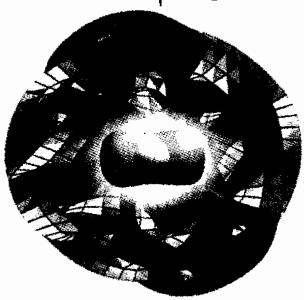
في عام 1987 أبدى شينغ تونغ ياو وتلميذه غانغ تيان الموجودان الآن بمعهد ماسيتشوسيتس للتقانة (MIT) ملاحظة رياضية مثيرة. فباستخدام طريقة رياضية معروفة جيداً وجدا أن أشكالاً معينة من أشكال كالابي-ياو يمكن أن تتحول إلى أشكال أخرى بتثقيب سطحها وإعادة حياكة الثقوب الناتجة ووفقاً لنسق رياضي دقيق[2]. وقد حددا تقريباً نوعاً معيناً من الكرات ذات البعدين - مثل سطح كرة الشاطئ - موجوداً داخل فراغ كالابي-ياو الأصلي، كما في الشكل رقم (11-2)، (وكرة الشاطئ ثلاثية الأبعاد مثل جميع الأجسام المألوفة. ونحن نتعامل هنا فقط مع سطحها ونهمل سمك المادة المصنوع منها هذا السطح وكذلك الفراغ الموجود بداخلها. وتتحدد مواقع النقاط على سطح كرة الشاطئ بإعطائها عددين - "خطوط عرض" و"خطوط طول" - تماماً كما نحدد مواقع النقاط على سطح الأرض. ولهذا السبب فإن سطح كرة الشاطئ ثنائي الأبعاد مثل خرطوم المياه الذي ناقشناه في الفصول السابقة). أخذ ياو وتلميذه في اعتبارهما تقلص الكرة حتى ضاقت وتحولت إلى نقطة مفردة، ما صورنا ذلك في تسلسل الأشكال في الشكل رقم (11-3). وقد بسطنا هذا الشكل والأشكال التالية في هذا الفصل بأن ركزنا على أكثر "القطع" مواءمة في الشكل كالابي-ياو. غير أنه لا بد أن نحتفظ في أذهاننا بملاحظة أن هذه التحولات إنما تحدث ضمن فراغات كالابي-ياو الأكبر من ذلك، كما في الشكل رقم (11-2). وأخيراً تخيل تيان وياو أنهما يشدان

(2) بالنسبة للقارئ ذي الميول الرياضية، تتضمن خطوات العمل اختزال المنحنيات المنطقية على مخروط كالابي-ياو ثم الاستفادة من حقيقة انه تحت ظروف معينة يمكن للتفرد الناتج أن يعدل عن طريق الفصل الدقيق المتميز.

برفق فراغ كالابي-ياو عند نقطة التقلص (الشكل رقم (11-4)، (a)) ليظهراها للعيان ثم يلصقاها في شكل آخر من أشكال كرات الشاطئ (الشكل رقم (11-4)، (b)) التي يمكن أن يعيدوا تسطيحها في شكل ممتلئ رائع (الشكل رقم (11-4)، (c) و(d)).

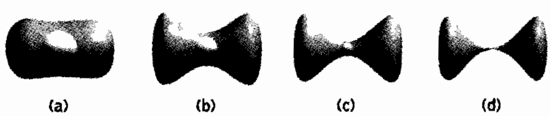
ويسمي علماء الرياضيات هذا التتابع من المناورة "التحول الانقلابي". ويبدو

الشكل رقم (11-2)



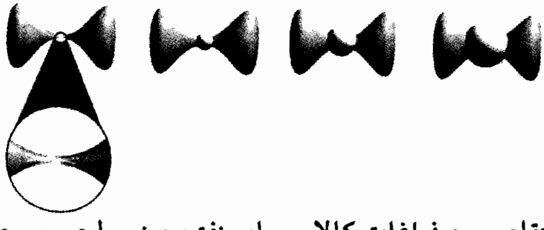
المنطقة المسلط عليها الضوء داخل الشكل كالابي-ياو تحتوي على الكرة.

الشكل رقم (11-3)



كرة داخل الشكل كالابي-ياو تتقلص باستمرار إلى نقطة ضاغطة على نسيج الفضاء. وقد قمنا بتبسيط هذا الشكل والأشكال التالية بإظهار جزء فقط من الشكل كالابي-ياو الكلي.

الشكل رقم (11-4)



تمزق فراغ متقلص من فراغات كالابي-ياو ينفتح وينمو ليصبح سطحه أملس. تحول الكرة الأصلية من الشكل رقم (11-3).

الأمر وكأن الشكل كرة الشاطئ الأصلية قد انقلب ليتحول إلى توجه جديد داخل الشكل كالابي-ياو. وقد لاحظ ياو وتيان وآخرون أنه في ظروف معينة، يختلف الشكل كالابي ياو الجديد الذي نتج من الانقلاب كما في الشكل رقم (11-4)، (d)، طوبولوجياً عن شكل كالابي-ياو الأصلي في الشكل رقم (11-3)، (a) إلى الشكل النهائي في الشكل رقم (11-4)، (d) من دون تمزيق نسيج فراغ كالابي-ياو في مرحلة ما في وسط هذا التحول.

ومن منطلق رياضي فإن هذه العملية لياو وتيان مثيرة لأنها تقدم طريقة لإنتاج فراغات جديدة لكالابي-ياو من الفراغات المعروفة. لكن إمكانياتها الكامنة تقع في دنيا الفيزياء حيث تثير السؤال المفعم بالإغواء: هل يمكن أن يحدث بالفعل هذا التسلسل الذي وضحناه بدءاً من الشكل رقم (11-3)، (a) وحتى الشكل رقم (11-4)، (d) في الطبيعة، بجانب كونه خطوات رياضية مجردة؟ وهل يمكن لنسيج الفضاء أن يتمزق ثم يعاد إصلاحه بالطريقة التي ذكرناها، وعلى النقيض من توقعات آينشتاين؟

ثانياً: منظور المرآة

بعد مرور بضعة أعوام على مشاهدات ياو ومعاونيه في العام 1987، ظل ياو يشجعني بين الحين والآخر على أن أفكر في التجسيد الفيزيائي لهذه التحولات الانقلابية، ولم أفعل. فقد كانت هذه التحولات تبدو لي مجرد جزء من الرياضيات البحتة من دون سند من فيزياء نظرية الأوتار. وفي الحقيقة، واعتماداً على المناقشات التي جاءت في الفصل العاشر، حيث اكتشفنا أن للأبعاد الدائرية حداً أدنى لنصف القطر، فإنه من المغري أن نقول بأن نظرية الأوتار لا تسمح للكرة في الشكل رقم (11-3) أن تتقلص إلى النهاية حتى تصبح نقطة. ولنتذكر، كما لاحظنا في الفصل العاشر أنه إذا انهارت كتلة من الفضاء - قطعة كروية من الشكل كالابي-ياو في هذه الحالة - على النقيض من انهيار بعد فضائي كامل، فإن المقولة التي تحدد أنصاف الأقطار الصغيرة والكبيرة ليست محل تطبيق مباشر هنا. ومع ذلك، فإن فكرة استبعاد التحول الانقلابي لا تصل لمرحلة الدقة، ويبدو احتمال تمزق نسيج الفضاء بعيداً.

غير أنه في ذلك الحين، في العام 1991 سأل الفيزيائي النروجي آندي لوتكن وبول آسبينول (زميلي في الدراسات العليا بجامعة أوكسفورد والأستاذ حالياً بجامعة ديوك) نفسيهما سؤالاً أصبح في غاية الإثارة: إذا حدث وتمزق نسيج فضاء كالابي-ياو الذي يخص هذا الجزء من عالمنا فماذا سيكون عليه المنظر من منطلق

صورة مرآة فراغ كالابي-ياو؟ وحتى ندرك الدافع وراء هذا السؤال علينا أن نسترجع أن الفيزياء الناجمة عن أي من ازدواج صور المرآة في أشكال كالابي-ياو (إذا اخترناها من الأبعاد الإضافية) هي واحدة، غير أن الرياضيات المعقدة التي على الفيزيائيين أن يستخدموها لاستخلاص الفيزياء من الممكن أن تختلف بشكل ملحوظ بين الاثنين. ضمن آسبينول ولوتكن أن التحول الانقلابي المعقد رياضياً في الشكلين رقمي (11-3) و(11-4) قد يكون له وصف صورة مرآة أبسط كثيراً - وهو الوصف الذي قد يعطي رؤية أكثر شفافية للفيزياء المرافقة.

وفي هذا الوقت لم يكن تناظر المرآة مفهوماً بالعمق المطلوب للإجابة عن السؤال الذي طرحاه. إلا أن آسبينول ولوتكن قد لاحظا أنه لا يوجد شيء في وصف صور المرآة يمكن أن يشير إلى نتيجة فيزيائية كارثية مرتبطة بتمزق الفراغ أثناء التحولات الانقلابية. وتقريباً في هذا الوقت كانت الأبحاث التي نجريها أنا وبليسير للبحث عن ازدواجات صور المرآة لأشكال كالابي-ياو[3] قد أدت بنا، من دون أن نتوقع ذلك، إلى أن نفكر في التحولات الانقلابية أيضاً. والتصاق النقاط المختلفة مع بعضها كما في الشكل رقم (11-4)، حقيقة رياضية معروفة جيداً - وهي العملية التي استخدمناها لتصميم أزواج صور المرآة - قد أدت إلى أوضاع هندسية تتطابق مع النتوءات والثقوب في الشكلين رقمي (11-3) و(11-4). ومع ذلك فلم نجد أنا وبليسير فيزيائياً أي كارثة ملازمة لذلك. والأكثر من ذلك، وبإيعاز من ملاحظات آسبينول ولوتكن (وكذلك بتشجيع من أبحاثهما مع غراهام روس) أدركنا أنا وبليسير أنه يمكننا إصلاح النتوءات رياضياً بطريقتين مختلفتين. أدت إحدى الطريقتين إلى الشكل كالابي-ياو الموجود في الشكل رقم (11-3)، (a) بينما تؤدي الأخرى إلى ما هو موجود في الشكل رقم (11-4)، (d). وقد أوحى لنا ذلك بأن التطور من الشكل رقم (11-3)، (a)، وحتى الشكل رقم (11-4)، (d) ما هو إلا شيء يمكن أن يحدث بالفعل في الطبيعة.

وبحلول آخر العام 1991 كان قليل من منظري نظرية الأوتار لديهم إحساس قوي بأن نسيج الفضاء "يمكن" أن يتمزق. لكن لم يكن لدى أي منهم الوسائل التقنية ليعضد أو يدحض هذا الاحتمال المذهل بكل تأكيد.

ثالثاً: السير ببطء إلى الأمام

وبين حين وآخر سنة 1992، حاولنا أنا وبليسير أن نبين أن نسيج الفضاء

(3) انظر الفصل العاشر من هذا الكتاب.

يمكن أن يمر بتحولات انقلابية نتيجة تمزق الفضاء. وقد أوجدت حساباتنا أجزاء متفرقة من دلائل ظرفية معضدة، لكننا لم نقع على البرهان الأكيد. وفي الربيع قام بليسير بزيارة معهد الدراسات المتقدمة بجامعة برنستون ليلقي محاضرة. وقد أخبر ويتن في جلسة خاصة عن محاولاتنا الحديثة للتحقق من رياضيات التحولات الانقلابية لتمزق الفراغ في إطار فيزياء نظرية الأوتار. وبعد أن لخص بليسير أفكارنا، انتظر ليسمع رد فعل ويتن. استدار ويتن مبتعداً عن السبورة وأخذ يحدق من خلال نافذة المكتب. وبعد دقيقة أو ربما دقيقتين من الصمت استدار ناحية بليسير وأخبره أنه إذا كانت أفكارنا صحيحة "سيكون ذلك أمراً مدهشاً". حمّس ذلك من جهودنا. ولكن بعد برهة، وبينما كان التقدم متوقفاً في هذا الشأن، اتجه كل منا للعمل على مشروعات أخرى في نظرية الأوتار.

وحتى مع هذا فقد وجدت نفسي أفكر ملياً في التحولات الانقلابية الناتجة من تمزق الفضاء. وبمرور الشهور، ازداد شعوري تأكيداً بأنها لا بد أن تكون جزءاً لا يتجزأ من نظرية الأوتار. وقد جعلت الحسابات الأولية التي أجريناها أنا وبليسير وكذلك المناقشات المثمرة مع دافيد موريسون، عالم الرياضيات من جامعة ديوك، جعلت الأمر يبدو وكأنه الاستنتاج الوحيد الذي يعضده تناظر المرآة بشكل طبيعي. وفي الحقيقة، وأثناء زيارة لجامعة ديوك قمت بالاشتراك مع موريسون وببعض الملاحظات التي قدمها شيلدون كاتس من جامعة ولاية أوكلاهوما، وكان موجوداً في زيارة لجامعة ديوك في نفس الوقت، وهي ملاحظات ساعدت كثيراً، قمنا بوضع الخطوط العريضة الاستراتيجية لنبرهن على أن التحولات الانقلابية يمكن أن تحدث في نظرية الأوتار. لكن عندما بدأنا بإجراء الحسابات المطلوبة وجدنا أنها شديدة الكثافة بشكل غير عادي. حتى أنه باستخدام أسرع الحاسبات فإنها قد تستغرق أكثر من قرن من الزمان لتكمل. لقد أحرزنا بعض التقدم، لكن من الواضح أننا في حاجة لفكرة جديدة، الفكرة التي تعلي من كفاءة طرق حساباتنا بشكل كبير. وقد توصل فيكتور باتيريف - وهو عالم رياضيات من جامعة إيسين - من دون أن يتعمد ذلك، إلى مثل هذه الفكرة ونشرها في مقالين في ربيع وصيف 1992.

أصبح باتيريف مهتماً جداً بتناظر المرآة، وخاصة في ضوء نجاح كانديلاس ومعاونيه في استخدام أبحاثه لحل معضلة إحصاء عدد الكرات الواردة في نهاية الفصل العاشر ومع ذلك، ومن منظور رياضي، لم يكن باتيريف مستريحاً إلى الطرق التي استشهدنا بها أنا وبليسير لاكتشاف أزواج صور المرآة في فراغات كالابي-ياو. وبالرغم من أن منطلقنا قد استخدم وسائل مألوفة لمنظري نظرية

الأوتار إلا أن باتيريف أخبرني في ما بعد أن بحثنا قد بدا له وكأنه "سحر أسود". ويعكس ذلك الانشقاق الثقافي الكبير بين مناهج الفيزياء والرياضيات، وعندما تقترب نظرية الأوتار من حدودهما، يصبح الاختلاف الشاسع في اللغة والطرق والأسلوب لكل مجال أكثر وضوحاً. فالفيزيائيون مثل الرواد الأوائل من مؤلفي الموسيقى، لا يمانعون في تطويع القواعد التقليدية في بحثهم عن الحلول. أما الرياضيون فهم أقرب ما يكونون لمؤلفي الموسيقى الكلاسيكيين، يؤلفون موسيقاهم في أطر أكثر جموداً، ولا ينتقلون إلى خطوة تالية إلا بعد الانتهاء تماماً من الخطوات السابقة. ولكلتا الطريقتين إيجابياتها وسلبياتها، فكل منهما تقدم طريقة فريدة للاكتشافات الخلاقة. وكما في الموسيقى الحديثة والكلاسيكية، لا يمكن القول بأن إحداهما على صواب والأخرى على خطأ - فالطرق التي يختارها المرء تخضع للذوق والتدريب بالشكل كبير.

بدأ باتيريف في إعادة تصميم نسخ صور المرآة في إطار رياضي اعتيادى أكثر، وقد نجح في ذلك. وقد توصل باتيريف إلى خطوات رياضية منهجية لصياغة أزواج من فراغات كالابي-ياو تمثل صور مرآة بعضها لبعض، وذلك بوحي من الأبحاث السابقة لـ "شي-شير روان"، عالم الرياضيات من تايوان. وقد تبسطت تصميماته لتصبح مثل الطريقة التي اكتشفناها أنا وبليسير في الأمثلة التي درسناها، لكنه قدمها في إطار أكثر عمومية مصوغة بطريقة اعتيادية أكثر بالنسبة للرياضيين.

والجانب الآخر في الموضوع هو أن أبحاث باتيريف قد اقتحمت مناطق في الرياضيات لم يطرقها معظم الفيزيائيين من قبل أبداً. فعلى سبيل المثال، يمكنني أن أستخلص لب الموضوع، لكنني أعاني من صعوبات كبيرة في فهم الكثير من التفاصيل الحرجة. غير أنه كان هناك أمر واحد واضح: فالطرق المستخدمة في أبحاثه، إذا فهمت وطبقت بصورة صحيحة يمكن أن تفتح خطاً جديداً في محاولات معالجة موضوع الانتقالات الانقلابية الناجمة عن تمزق الفضاء.

وفي أواخر الصيف، مدفوعاً بالحماس الذي جاءت به هذه التطورات، قررت أنني راغب في العودة إلى مشكلة الانقلابات كلية وبتفرغ تام. وقد علمت من موريسون أنه سيذهب في إجازة دراسية من جامعة ديوك ليقضيها في معهد الدراسات المتقدمة، وعلمت كذلك أن آسبينول سيكون هناك كزميل في مهمة علمية لما بعد الدكتوراه. وبعد عدة مكالمات تليفونية ورسائل إلكترونية، استطعت أن أحصل على إجازة دراسية من جامعة كورنيل لقضاء خريف 1992 في هذا المعهد أيضاً.

رابعاً: ظهور استراتيجية

من الصعب إيجاد مكان أكثر مثالية لقضاء ساعات طويلة من المناقشات الجادة أكثر من معهد الدراسات المتقدمة. تأسس هذا المعهد في العام 1930، ويقع في حقول تموج بالخضرة على حدود غابة جميلة تبعد بضعة أميال عن موقع جامعة برنستون. ويقال إنه لا شيء يلهيك عن عملك في هذا المعهد، حيث أنه لا يوجد ما يلهيك.

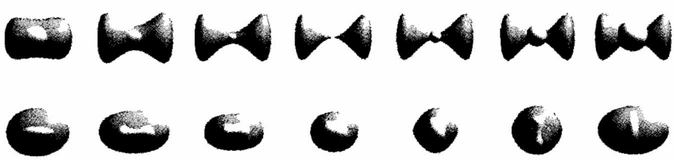
وقد التحق آينشتاين بهذا المعهد في العام 1933 بعد أن غادر ألمانيا ومكث هناك طوال حياته بعد ذلك. ولا يحتاج الأمر إلى كثير من الخيال لنتصور آينشتاين وهو يحوم حول نظرية المجال الواحد في أروقة هذا المعهد الغارق في الهدوء والعزلة. فتراث التفكير العميق ينتشر في الجو، الذي في حين يتوقف على مدى التقدم المباشر لديك، يمكن أن يكون إما مثيراً أو شديد الوطأة.

وبعد فترة وجيزة من الوصول إلى هذا المعهد، كنت أنا وآسبينول نسير في شارع ناسو (الشارع التجاري الرئيسي في مدينة برنستون) محاولين أن نختار مكاناً لتناول العشاء. ولم يكن هذا الأمر هيناً، حيث أن بول من المتعصبين لأكل اللحوم، بينما أنا نباتي. وبينما نحن في خضم حديثنا عن حياتنا أثناء سيرنا، سألني أسبينول عما إذا كانت عندي أفكار لأبحاث جديدة. أجبته أن عندي بالفعل، وأعدت على مسمعه أهمية استيضاح أن الكون يمكن أن يعاني من تحولات ناجمة عن تمزق الفضاء، إذا كان من الممكن وصف العالم بنظرية الأوتار. وسردت الخطوط الاستراتيجية العريضة التي كنت أتبعها، وكذلك الآمال الجديدة التي جاءت مع أبحاث باتيريف ويمكن أن تسمح لنا بملء الفراغات. وقد تصورت أنني أعظ بول، وأنه سيثار بهذا الحديث. لكن الأمر لم يثره. وفي المقابل كان تحفظه نابعاً من طول ممارستنا الذهنية الطيبة لمقارعة بعضنا أفكار بعض. وبعد عدة أيام تقابلنا، ووجهنا كل اهتمامنا للتحولات الفجائية.

وفي ذلك الحين، وصل موريسون إلى المعهد، وفي جلسة ضمت ثلاثتنا في حجرة الشاي، تناولنا صياغة استراتيجية في هذا الشأن. واتفقنا أن يكون هدفنا المحوري هو تحديد ما إذا كان التطور من الشكل رقم (11-3)، (a) إلى الشكل رقم (11-4)، (d) يمكن أن يحدث بالفعل في عالمنا. لكن كان التعامل المباشر مع هذا السؤال مستحيلاً حيث أن المعادلات التي تصف هذا التطور كانت في غاية الصعوبة، وبخاصة عندما يحدث تمزق للفضاء. وفي المقابل، فإننا قد اخترنا إعادة صياغة الموضوع مستخدمين وصف صور المرآة، وآملين أن تكون

المعادلات المعنية أكثر طواعية. وهذا الأمر موضح بصورة تخطيطية في الشكل رقم (11-5) الذي فيه الصف الأعلى هو التطور الأصلي من الشكل رقم (11-3)، (a) إلى الشكل رقم (11-4)، (d)، والصف السفلي هو نفس التطور من منظور صور المرآة لأشكال كالابي-ياو. وكما أدرك عدد منا، اتضح أن إعادة الصياغة ناحية صور المرآة متمشية تماماً مع فيزياء الأوتار ولا يقابلها أية كارثة. وكما ترى، لا يبدو أن هناك أي تمزق أو تشوه في الصف السفلي من الشكل رقم (11-5). إلا أن السؤال الحقيقي الذي أثارته هذه الملاحظات كان: هل نقوم بدفع تناظر صور المرآة أبعد من حدود تطبيقاتها؟ وبالرغم من أن أشكال كالابي-ياو في الصف الأعلى والصف الأسفل الموجودة في أقصى اليسار في الشكل رقم (11-5) تعطي نفس الفيزياء، فهل حقيقي أنه عند كل خطوة من خطوات التطور من الجانب الأيسر في اتجاه الجانب الأيمن في الشكل رقم (11-5) - لا بد بالضرورة أن تمر الأشكال بمراحل من التمزق والتشوه - تكون الخواص الفيزيائية للشكل الأصلي وصور المرآة واحدة؟

الشكل رقم (11-5)



التحول الفجائي الناجم عن تمزق الفضاء (الصف الأعلى) وإعادة الصياغة لصورة المرآة (الصف الأسفل) المقابلة لها.

وعلى الرغم من أنه كان لدينا حجج قوية لنعتقد أن العلاقة الوطيدة بين صور المرآة ستظل صالحة أثناء تطور الأشكال، مؤدية إلى التمزق في الصف الأعلى لأشكال كالابي-ياو في الشكل رقم (11-5)، فقد أدركنا أنه لا يعرف أحد ما إذا كان الصف الأعلى أو الصف الأسفل لأشكال كالابي-ياو في الشكل رقم (11-5) سيستمر في التواجد على شكل صورة مرآة بعد حدوث التمزق. وهذا سؤال حرج، لأنه لو كان الأمر كذلك، فإن عدم وجود كارثة في منظور صورة المرآة يعني عدم وجودها في الصورة الأصلية، ونكون بذلك قد بينا أن الفضاء يمكن أن يتمزق في نظرية الأوتار. وأدركنا أنه يمكن اختزال هذا السؤال ليصبح مجرد حسابات: استخلص خواص الكون الفيزيائية لشكل كالابي-ياو الأعلى بعد

حدوث التمزق (مستخدماً مثلاً الشكل الأيمن العلوي من أشكال كالابي-ياو في الشكل رقم (11-5)) وكذلك لصورة المرآة المفترضة (الشكل الأيمن السفلي من أشكال كالابي-ياو في الشكل رقم (11-5)) ولتر ما إذا كانا متطابقين.

لقد كانت تلك هي الحسابات التي كرسنا أنفسنا لها أنا وموريسون وآسبينول في خريف العام 1992.

خامساً: الليالي الأخيرة في وقع خطوات آينشتاين النهائية على الأرض

إن فكر إدوارد ويتن الثاقب مغلف في مسلك ناعم في الحديث يحمل في طياته غالباً السخرية. وينظر إليه على أنه خليفة آينشتاين كأعظم فيزيائي في العالم على قيد الحياة. ويذهب البعض إلى أبعد من ذلك فيصفونه بأنه أعظم فيزيائي في كل العصور. ويتمتع بنهم شديد تجاه المشكلات الشائكة في الفيزياء، وله تأثير هائل في صياغة اتجاه البحث في نظرية الأوتار.

ومجالات إنتاج ويتن أسطورية. وتصوره زوجته تشيارا نابي - وهي فيزيائية في نفس المعهد كذلك - وهو جالس إلى طاولة المطبخ يختبر بذهنه حدود المعرفة في نظرية الأوتار، وبين لحظة وأخرى يلتقط ورقة وقلماً ليتحقق من بعض التفصيلات المحيرة[4]. ويروي أحد زملاء البحث رواية أخرى عنه في صيف ما عندما كان مكتبه مجاوراً لمكتب ويتن. وهو يصف عدم الاستقرار في وضع حسابات نظرية الأوتار المعقدة أثناء جلوسه إلى مكتبه وهو يستمع إلى الدقات المتلاحقة والمتناغمة للوحة الأزرار في كمبيوتر ويتن، حيث تنساب المقالات العلمية الخطيرة واحدة تلو الأخرى من عقله إلى ملفات الكمبيوتر.

وفي غضون أسبوع أو أكثر من وصولي، وبينما كنا نتحاور أنا وويتن في فناء المعهد، سأل عن خطط أبحاثي. أخبرته عن التحولات الفجائية الناجمة عن تمزق الفضاء والاستراتيجية التي خططنا لاتباعها. تحمس بشدة عند سماعه هذه الأفكار، لكنه حذر من ذلك لأنه تصور أن الحسابات قد تكون في غاية الصعوبة وأشار إلى نقطة الضعف المحتملة في الاستراتيجية التي شرحتها، والتي لها صلة ببعض الأبحاث التي كنت قد أجريتها منذ بضع سنوات مع فافا ووارنر. وقد اتضح أن الموضوع الذي أثاره مجرد أمر يمس منطلقاتنا لفهم التحولات الفجائية، لكن ذلك جعله يبدأ التفكير في الأمر الذي اتضح أن له علاقة بأبحاثنا وأنه ومكمل لها.

قررنا أنا وأسبينول وموريسون أن نقسم حساباتنا إلى قسمين. وللوهلة الأولى

(4) K. C. Cole, "A Theory of Everything," *New York Times Magazine* (18 October 1987), p. 20.

قد يبدو أن التقسيم الطبيعي يتضمن أولاً استخلاص الفيزياء المتعلقة بأشكال كالابي-ياو في الصف الأعلى من الشكل رقم (11-5) ، ثم نفعل نفس الشيء بعد ذلك لأشكال كالابي-ياو النهائية في الصف الأسفل في الشكل رقم (11-5) . فإذا لم تنشطر علاقات صور المرآة إلى أجزاء بواسطة التمزق في الصف العلوي لأشكال كالابي-ياو، فإن هذين الشكلين النهائيين من أشكال كالابي-ياو سيعطيان نفس الفيزياء، تماماً مثل شكلي كالابي-ياو الأصليين اللذين جاءا منهما. (وتُجنبنا هذه الطريقة في صياغة المشكلة كل الحسابات الصعبة التي تتضمن أشكال كالابي-ياو في الصف الأعلى عندما تبدأ في التمزق). ومع ذلك يتضح أن حسابات الفيزياء المتعلقة بأشكال كالابي-ياو النهائية في الصف الأعلى واضحة بشكل جيد. وتكمن الصعوبة الحقيقية في إجراء هذا البرنامج أولاً في تصور الشكل الدقيق لفراغات كالابي-ياو النهائية في الصف الأسفل من الشكل رقم (11-5) - صورة المرآة المفترضة لأشكال كالابي-ياو في الصف الأعلى - ثم بعد ذلك في استخلاص الفيزياء المعنية.

كان كانديلاس قد أنجز منذ بضع سنوات مضت طريقة لاستكمال المهمة الثانية: استخلاص الصفات الفيزيائية لفراغ كالابي-ياو النهائي في الصف الأسفل بمجرد معرفة شكلها بالضبط. كانت حساباته مكثفة، الأمر الذي دفعنا للاعتقاد أن الموضوع يتطلب برنامج كمبيوتر ذكياً لإجراء تلك الحسابات في مثالنا. كان آسبينول مبرمجاً بارعاً بجانب كونه فيزيائياً متميزاً، وقد أخذ على عاتقه إنجاز هذه المهمة. في هذا الوقت بدأنا أنا وموريسون استكمال المهمة الأولى لتحديد الشكل الدقيق لصورة المرآة المحتملة من فراغ كالابي-ياو.

وهنا، شعرنا بأن أبحاث باتيريف يمكن أن تقدم لنا بعض الحلول الهامة. ومرة أخرى، مع ذلك، بدأ الانشقاق الثقافي بين الرياضيات والفيزياء - وفي هذه الحالة بيني وبين موريسون - في إعاقة التقدم. كنا في حاجة إلى تضافر قوى المجالين لإيجاد "الصيغة الرياضية" لأشكال كالابي-ياو في الصف الأسفل، والتي يجب أن تعبر عن نفس فيزياء العالم مثل أشكال كالابي-ياو في الصف الأعلى، إذا كان التمزق الفجائي من خصائص الطبيعة. لكن لم يكن أي منا ضليعاً في تخصص الآخر ليرى بوضوح كيف يصل إلى نهاية هذا الموضوع. وقد اتضح لدينا أن علينا أن نتحمل: فكل منا يحتاج إلى منهج مكثف في مجال خبرة الآخر. وهكذا قررنا أن نمضي أيامنا في بذل أقصى ما يمكن في الحسابات بينما نمضي الأمسيات في هيئة أستاذ وطالب في نفس الوقت: فأحاضر أنا موريسون لساعة أو أكثر في الفيزياء اللازمة للموضوع، ثم يقوم بدوره بتقديم محاضرة لي لمدة ساعة

أو أكثر في الرياضيات اللازمة. كانت الدراسة تنتهي في هذه المدرسة حوالي الحادية عشرة مساء.

التزمنا بهذا البرنامج يوماً بعد يوم. كان التقدم بطيئاً لكننا كنا نشعر بأن الأمور بدأت تسير في مسارها الصحيح. وفي هذه الأثناء كان ويتن قد توصل إلى مقدمات ذات مغزى في إعادة صياغة النقاط الضعيفة التي حددها من قبل. كانت أبحاثه تؤسس طريقة جديدة وأكثر قدرة على مزج فيزياء نظرية الأوتار برياضيات فراغات كالابي-ياو. كنا نجتمع يومياً بصورة عفوية أنا وآسبينول وموريسون مع ويتن حيث كان يعرض علينا الأفكار التي تجيء بها طريقته. وبمرور الأسابيع أصبح من الواضح تدريجياً، وعلى غير المتوقع، أن أبحاثه التي بدأت من نقطة مختلفة تماماً عن النقطة التي بدأنا منها، كانت تقترب من موضوع التحولات الفجائية. وشعرنا أنا وآسبينول وموريسون أننا إذا لم نكمل على وجه السرعة حساباتنا فإن ويتن سيتغلب علينا بالضربة القاضية.

سادساً: ست علب والعمل في عطلة نهاية الأسبوع

لا شيء يدفع الفيزيائيين لتركيز انتباههم مثل المنافسة الشريفة، وهو بالضبط ما دفعنا للعمل بهمة أكبر أنا وآسبينول وموريسون. كان ذلك يعني شيئاً ما بالنسبة لآسبينول. كان آسبينول مزيجاً غريباً من الإحساس البريطاني عند الشريحة العليا من الطبقة المتوسطة، وهو نتاج بقائه عقداً من الزمن في أوكسفورد كطالب للمرحلة الأولى الجامعية ثم طالب دراسات عليا، وقد تشرب خلال هذه الفترة قليلاً من الدهاء وروح الفكاهة. ولعل آسبينول هو أكثر الفيزيائيين الذين أعرفهم تحضراً، إذا تناولنا عاداته في العمل. وبينما يعمل الكثير منا حتى وقت متأخر من المساء، فإنه لا يعمل إطلاقاً بعد الخامسة مساءً. وبينما يعمل الكثير منا أثناء عطلة نهاية الأسبوع، فإنه لا يفعل ذلك. ويتمكن آسبينول من فعل ذلك لأنه حاد الذكاء وينظم وقته بكفاءة. ومعنى العمل بهمة أكثر عنده هو مجرد رفع مستوى كفاءة عمله إلى الأعلى.

أصبح الوقت أوائل كانون الأول/ ديسمبر. كنا أنا وموريسون نحاضر بعضنا البعض لعدة شهور، وبدأنا نشعر بأننا نجني عائداً من ذلك. وأصبحنا قريبين جداً من التمكن من تعريف الشكل الدقيق لفراغ كالابي-ياو الذي نبحث عنه. وفوق ذلك، فقد كان آسبينول على وشك الانتهاء من برمجة الكمبيوتر، وكان في انتظار نتائجنا، التي كانت تمثل المدخلات المطلوبة لبرنامجه. كانت ليلة الخميس عندما أصبحنا أنا وموريسون على يقين بأننا نعرف كيف نُعرِّف الشكل كالابي-ياو الذي

كنا نبحث عنه. انتهى ذلك كله على طريقة تتطلب شفرة بسيطة نوعاً ما وخاصة بها. وبعد ظهر يوم الجمعة كنا قد كتبنا البرنامج، وفي ليلة الجمعة كنا قد حصلنا على نتائجنا.

غير أننا كنا قد تخطينا حاجز الخامسة مساء من يوم الجمعة، وكان آسبينول قد غادر إلى بيته ولن يعود قبل يوم الاثنين. ولم يكن في إمكاننا إنجاز أي شيء بدون برنامجه على الكمبيوتر. ولم نتخيل أننا أنا أو موريسون سنقدر على الانتظار طوال عطلة نهاية الأسبوع. كنا على وشك الإجابة عن السؤال الذي طال حومنا حوله عن تمزق الفضاء في نسيج الكون، وكان القلق أكبر مما نحتمل. طلبنا آسبينول بالتليفون في بيته. رفض في البداية أن يعمل في صباح اليوم التالي كما طلبنا منه. لكن وبعد فترة من التمنع وافق على مضض أن ينضم إلينا شريطة أن نشتري له صندوقاً من البيرة. وقد وافقنا.

سابعاً: لحظة من الحقيقة

التقينا جميعاً في المعهد صباح السبت كما خططنا لذلك. كان الصباح مشمساً وضاحاً. وكان الجو مريحاً. وكنت أنا نفسي غير متأكد من قدوم آسبينول، وعندما جاء أخذت على مدى ربع الساعة أطري أهمية وجوده معنا لأول مرة في عطلة نهاية أسبوع في المكتب. وقد أكد لي أن ذلك لن يتكرر مرة أخرى.

التففنا نحن الثلاثة حول الكمبيوتر الخاص بموريسون في المكتب المشترك بيني وبينه. أخبر آسبينول موريسون عن كيفية استخراج برنامجه على شاشة الكمبيوتر وشرح لنا الصيغة الدقيقة للمدخلات المطلوبة. عدل موريسون بالطريقة المناسبة النتائج التي توصلنا إليها في الليلة السابقة وأصبحنا على استعداد لبدء العمل.

وخلاصة القول، كانت الحسابات التي نجريها تهدف إلى تحديد كتلة نوع معين من الجسيمات - نسق اهتزازي خاص لأحد الأوتار - عندما يتحرك خلال الكون الذي يحتوي شكل كالابي-ياو الذي أنفقنا كل الخريف لتحديده. كنا نأمل في ضوء الاستراتيجية التي ناقشناها من قبل - أن تتفق هذه الكتلة تماماً مع حسابات مماثلة أجريت على الشكل كالابي-ياو الذي نتج من التحول الفجائي الناجم عن تمزق الفضاء. كانت الحسابات الأخيرة هي الأسهل نسبياً وكنا قد فرغنا منها منذ بضعة أسابيع، وقد اتضح أن الإجابة هي 3، بنفس الوحدات التي كنا نستخدمها. وحيث أننا كنا نجري الحسابات العددية على صور المرآة المفترضة بالكمبيوتر، فإننا توقعنا الحصول على نتيجة قريبة جداً، لكن ليست 3 بالضبط،

كأن تكون مثلاً 3.00001 أو 2.999999 بالفارق الذي ينشأ عن تقريب الخطأ.

جلس موريسون إلى الكمبيوتر وأخذ يحوم بإصبعه قرب زر "المدخل" (Enter) على لوحة الأزرار. وبتوتر متزايد قال "سنبدأ"، وضغط على الزر لتبدأ عملية الحسابات. وفي غضون بضع ثوان جاء جواب الكمبيوتر بالعدد 8.999999. هبط قلبي في قدمي. هل من الممكن أن تشطر التحولات الفجائية، الناجمة عن تمزق الفضاء علاقات صور المرآة، مما يعني أنها لا يمكن أن تحدث بالفعل؟ وتيقنا في التو أن أمراً غريباً لا بد أن يكون قد حدث. فإذا لم يكن هناك في الواقع تطابق بين الفيزياء الناتجة من الشكلين، فمن غير المحتمل أبداً أن تجيء حسابات الكمبيوتر بإجابات على هذا القرب من عدد صحيح. فإذا كانت أفكارنا على خطأ، فليس هناك سبب واحد في العالم لتوقع أي شيء سوى عدد عشوائي. لقد حصلنا على نتيجة خاطئة، لكنها تعني أننا ربما نكون قد ارتكبنا خطأ حسابياً بسيطاً. توجهنا أنا وآسبينول إلى السبورة، واكتشفنا خطأنا في لحظة: لقد أغفلنا معامل 3 في حساباتنا "الأبسط" التي أجرينا منذ عدة أسابيع، والإجابة الحقيقية هي 9. وبذا كانت إجابة الكمبيوتر هي ما كنا نبتغيه فقط.

وطبعاً، لم يكن التوافق مع ما كنا قد حصلنا عليه سوى أمر هامشي في إقناعه. لأنك إذا كنت تعرف الإجابة التي تسعى وراءها، فغالباً من السهل أن تجد طريقاً للوصول إليها. ولذا تطلب الأمر مثالاً آخر. وحيث أننا كنا قد كتبنا كل البرامج الضرورية للكمبيوتر، لم يكن ذلك بالأمر الصعب. قمنا بحساب كتلة جسيمة أخرى على أحد أشكال كالابي-ياو من الصف الأعلى، متخذين حذرنا كيلا نقع في أي خطأ. كانت الإجابة 12. ومرة ثانية التففنا حول الكمبيوتر وبدأنا العمل. وبعد عدة ثوان ظهر الرقم 11.999999. إنه التوافق. لقد أثبتنا أن صورة المرآة المفترضة هي صورة المرآة بالفعل، وعليه فإن التحولات الفجائية الناجمة عن تمزق الفضاء هي جزء من فيزياء نظرية الأوتار.

وهنا قفزت من مقعدي، وركضت دورة النصر حول المكتب لاشعورياً. أضاء وجه موريسون أمام الكمبيوتر، لكن كان رد فعل آسبينول مختلفاً. "إنه أمر عظيم، لكنني كنت أعرف أن الأمور ستسير كذلك"، ثم أضاف بهدوء: "أين البيرة؟".

ثامناً: منطلق ويتن

ويوم الاثنين التالي، ذهبنا مزهوين إلى ويتن وأعلمناه بنجاحنا. كان مسروراً للغاية بنتائجنا. اتضح أنه كان قد توصل بدوره منذ فترة وجيزة إلى طريقة تؤكد أن التحولات الفجائية تحدث في نظرية الأوتار. كانت أدلته مختلفة تماماً عن أدلتنا،

وكانت توضح بجلاء إدراكنا لأسباب عدم حدوث أية كوارث نتيجة لتمزق الفضاء على المستوى المجهري.

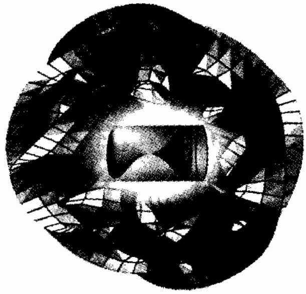
وقد ألقى منطلق ويتن الضوء على الفرق بين نظرية الجسيمة النقطة ونظرية الأوتار عندما يحدث مثل هذا التمزق. والتمييز الأساسي هو أن هناك نوعين من حركة الوتر بالقرب من موقع التمزق، لكن هناك نوعاً واحداً فقط من الحركة في حالة الجسيمة النقطة. وبالتحديد، يستطيع الفرد أن ينتقل مجاوراً للتمزق كما تفعل الجسيمة النقطة، لكنه يستطيع أيضاً أن يلتف حول التمزق أثناء حركته إلى الأمام، كما في الشكل رقم (11-6). وخلاصة القول، إن تحليل ويتن يكشف أن الأوتار التى تلتف حول التمزق، وهو الأمر الذي لا يمكن أن يحدث في نظرية الجسيمة النقطة، تحجب العالم المحيط عن التأثيرات الكارثية التي بدون ذلك كان سيتعرض لها. كما لو كان عالم الوتر الذي على شكل فرخ أو لوحة رقيقة - ولنسترجع من الفصل 6 أن هذا العالم الذي ينزلق فيه الوتر أثناء حركته خلال الفضاء هو سطح ثنائي الأبعاد - يقدم حاجزاً حامياً يلغي تماماً السمات الكارثية للتحطم الهندسي في النسيج الفضائي.

وقد نتساءل ماذا لو حدث مثل هذا التمزق ولم يكن هناك أوتار بالقرب لتحجبه؟ وفوق ذلك، قد يعنيك أنه عند لحظة حدوث التمزق فإن الوتر - وهو حلقة في غاية الرقة - سيزودك بحماية في كفاءة ما يقدمه طوق الهولاهوب للحماية من قنبلة عنقودية. وحل هذين السؤالين يكمن في سمة محورية في ميكانيكا الكم سبق أن ناقشناهما في الفصل الرابع.. وقد رأينا بناءً على صياغة فينمان لميكانيكا الكم أن أي جسم مهما كان، جسيمة أو وتراً فإنه، ينتقل من موقع لآخر عبر كل المسارات الممكنة.

والحركة الناتجة التي لاحظناها هي تجمع لكل الاحتمالات، مع المساهمة النسبية لكل مسار محتمل، التي تم تحديدها بدقة بواسطة رياضيات ميكانيكا الكم. فإذا ما حدث تمزق في نسيج الفضاء، فإن مسارات الأوتار التي تلتف حول التمزق ستكون من بين المسارات المحتملة - مسارات مثل تلك الموجودة في الشكل رقم (11-6). وحتى إذا بدا أنه لا توجد أوتار بالقرب من التمزق عندما يحدث، فإن ميكانيكا الكم تأخذ في الاعتبار التأثيرات الفيزيائية لكل المسارات المحتملة للأوتار، التي من بينها العديد (عدد لانهائي في الواقع) من المسارات الواقية التي تلتف حول التمزق. إنها تلك المسارات التي بيّن ويتن أنها تلاشي بالضبط الكارثة الكونية التي كانت لتحدث نتيجة للتمزق.

قدم ويتن وثلاثتنا أبحاثنا في كانون الثاني/ يناير 1993 في نفس الوقت إلى

الشكل رقم (11-6)



عالم الفرخ أو اللوح الذي يتكون من الوتر يقدم حاجزاً يلاشي التأثيرات الكارثية المحتملة والمرافقة لتمزق النسيج الفضائي.

الأرشيف الإلكتروني للإنترنت الذي من خلاله تتاح مقالات الفيزياء في التو واللحظة في جميع أنحاء العالم. وقد وصفت المقالتان، من منظورين جد مختلفين، الأمثلة الأولى للتحولات المتغيرة طوبولوجياً (Topology-Changing Transit) - وهو الاسم التقني لعمليات تمزق الفضاء التي اكتشفناها. وهكذا تم حل التساؤل الذي ظل قائماً مدة طويلة عما إذا كان في استطاعة الفضاء أن يتمزق، بطريقة كمية بواسطة نظرية الأوتار.

تاسعاً: النتائج

لقد أنجزنا الكثير على طريق التحقق من أن التمزق الفضائي يحدث دون كوارث فيزيائية. لكن ما الذي يحدث عندما ينشطر نسيج الفضاء؟ وما هي النتائج التي يمكن ملاحظتها؟ لقد رأينا أن الكثير من خواص الكون من حولنا تعتمد على البنية التفصيلية للأبعاد المتجعدة. وهكذا فإنك قد تظن أن التحول الراديكالي نسبياً من أحد أشكال كالابي-ياو إلى الآخر كما في الشكل رقم (11-5)، قد يكون له تأثير فيزيائي واضح. غير أنه في الحقيقة، فإن الأبعاد الموجودة في النصف الأسفل التي استخدمناها لتصوير الأشكال جعلت التحولات تبدو أكثر تعقيداً إلى حد ما مما هي عليه بالفعل. فإذا تصورنا أشكالاً ذات ستة أبعاد، فإننا قد نرى فعلاً أن النسيج يتمزق، لكنه يحدث بطريقة أكثر سلاسة. وهو أكثر شبهاً بحشرة العثة وهي تأكل الصوف في بنطلون متجعد بشدة عند الركبة.

وتبين أبحاثنا وأبحاث ويتن أن الخواص الفيزيائية مثل عدد عائلات تذبذب الأوتار وأنواع جسيمات كل عائلة لا تتأثر بهذه العمليات. فإذا تطور الشكل

كالابي-ياو من خلال التمزق، فإن ما يمكن أن يتأثر هو القيم الدقيقة لكتلة الجسيمة وطاقة أنساق اهتزاز الأوتار المحتملة. وقد بينت أبحاثنا أن هذه الكتلة ستتغير باستمرار كرد فعل للتغير في الشكل الهندسي لمكونات كالابي-ياو في الفضاء، فبعضها سيتجه إلى أعلى والآخر إلى أسفل. ومع ذلك فإن ما يمثل الأهمية القصوى هو حقيقة أنه ليس هناك كارثة فجائية أو أي سمة غير عادية للكتل المتباينة عندما يحدث التمزق بالفعل. ومن وجهة نظر الفيزياء فإن لحظة التمزق ليس لها ما يميزها من خواص.

وتثير هذه النقطة موضوعين. الأول، أننا قد ركزنا على التمزق في نسيج الفضاء الذي يحدث في الأبعاد الستة الإضافية لمكونات كالابي-ياو في العالم. هل من الممكن لمثل هذه التمزقات أن تحدث في الأبعاد الثلاثة الممتدة الأكثر ألفة؟ والجواب بكل تأكيد على الأغلب هو أجل. ففي النهاية الفضاء يظل فضاء - بصرف النظر عما إذا كان متجعداً في أشكال كالابي-ياو بشدة أو ممتداً على طول الاتساع الهائل للعالم الذي نشاهده في ليلة صافية بادية النجوم. وفي الحقيقة، فقد رأينا من قبل أن الأبعاد الفضائية المألوفة قد تتجعد بنفسها على نفسها فعلاً في صورة أشكال عملاقة، سالكة طريقها في الناحية الأخرى من العالم، ولذا فإن التمييز بين أي الأبعاد متجعد وأيها ممتد ما هو إلا تمييز مصطنع. ومع أن تحليلاتنا وتحليلات ويتن تقوم على صفات رياضية خاصة لأشكال كالابي-ياو فالنتيجة - التي هي أن نسيج الفضاء يمكن أن يتمزق - هي بكل تأكيد ذات إمكانيات أوسع في التطبيق.

أما الموضوع الثاني فهو هل يمكن لمثل هذا التمزق الذي يغير من الطوبولوجيا أن يحدث اليوم أو غداً؟ وهل من الممكن أن يكون قد حدث في الماضي؟ أجل. فالقياسات التجريبية لكتلة الجسيمات الأولية تبين أن قيمتها ثابتة لفترات طويلة. لكن إذا عدنا للخلف إلى العصور المبكرة التي تلت الانفجار الهائل، فإنه حتى النظريات التي لا تعتمد على الأوتار توضح وجود فترات هامة تتغير أثناءها كتلة الجسيمات الأولية مع الزمن. وقد تتضمن هذه الفترات تمزقات تغير من الطوبولوجيا، كما ناقشنا في هذا الفصل، وذلك من منطلق نظرية الأوتار. وباقترابنا من الوقت الحاضر، فإن ثبات كتلة الجسيمات الأولية الذي نلاحظه يعني أنه لو كان العالم يعاني تمزقات فضائية مغيرة للطوبولوجيا حالياً، فلا بد من أن يحدث ذلك في غاية البطء - من البطء بحيث يكون تأثيرها على كتلة الجسيمات الأولية من الصغر لدرجة أن حساسية أجهزتنا الحالية تعجز عن اكتشافها. ومن المثير للملاحظة أنه إذا كان ذلك هو ما يحدث فإن العالم قد يكون حالياً في

وسط عملية تمزق فضائي. فإذا كان ذلك يحدث ببطء كاف، فإننا لن ندرك ما إذا كان ذلك يحدث. ويمثل ذلك إحدى اللحظات النادرة في الفيزياء التي فيها يكون افتقاد الظاهرة المثيرة التي يمكن مشاهدتها، سبباً في إثارة عظيمة. وغيبة نتائج كارثية يمكن ملاحظتها عن مثل هذا التطور الهندسي الغريب مثل ميثاق يبين مدى التقدم الذي أحرزته نظرية الأوتار أبعد من توقعات آينشتاين.

الفصل الثاني عشر

ما بعد الأوتار

في البحث عن نظرية - M

فكّر آينشتاين، أثناء بحثه الطويل عن النظرية الموحّدة، في "ما إذا كان أمكن الله أن يخلق الكون بطريقة مختلفة؛ أي ما إذا كانت ضرورة البساطة المنطقية تركت له أي حرية"[1]. وبهذه الملاحظة يكون آينشتاين قد صاغ الصورة الحديثة لوجهة النظر التي يشاركه فيها كثير من الفيزيائيين حالياً: فإذا كانت هناك نظرية نهائية للطبيعة، فإن أكثر الأمور إقناعاً لدعم صيغتها سيكون كونها لا يمكن أن توجد إلا على هذا الشكل. ولابد للنظرية النهائية أن تتخذ الشكل الذي هي عليه لأنها الإطار الفريد القادر على تفسير ووصف الكون من دون الاصطدام بأي عدم توافق داخلي أو غرابة منطقية. وتزعم مثل هذه النظرية أن الأشياء على ما هي عليه لأنها "يجب" أن تكون كذلك. فكل الاحتمالات مهما كانت صغيرة ستؤدي إلى نظرية مثل العبارة القائلة "هذه الجملة كاذبة"، فهي تغرس بذور تحطمها بنفسها.

وهكذا، فإن التوصل إلى مثل هذا الأمر الحتمي لبنية العالم، قد يؤدي بنا بعد رحلة طويلة إلى فهم بعض أعمق الأسئلة على مر العصور. وتؤكد هذه الأسئلة على الغموض الذي يحيط "بمن أو ما" الذي جعل هذه الاختيارات الظاهرية التي لا حصر لها، والتي يتطلبها تصميم عالمنا. وتجيب الحتمية عن هذه الأسئلة بأن تلغي الاختيارات. والحتمية هنا تعني في الواقع عدم وجود اختيارات، كما تزعم الحتمية أن العالم لا يمكن أن يكون شيئاً مختلفاً. وكما سنناقش في الفصل 14، لا يوجد شيء يؤكد أن العالم قد تم تصميمه على هذه الدرجة من الدقة. ورغم ذلك فإن السعي وراء مثل هذه الصرامة في قوانين الطبيعة يقع في قلب برنامج التوحد في الفيزياء الحديثة.

وبحلول نهاية ثمانينيات القرن العشرين، بدا للفيزيائيين أنه على الرغم من أن نظرية الأوتار قد اقتربت كثيراً من صياغة صورة فريدة للعالم، إلا أنها لم تصل

(1) آلبرت أينشتاين في اقتباس عن: John D. Barrow, *Theories of Everything: The Quest for Ultimate Explanation* (NewYork: Fawcett-Columbine, 1992), p. 13.

لذلك. كان هناك سببان لهذا. السبب الأول، كما أشرنا باختصار إليه في الفصل السابع، اكتشف الفيزيائيون أن هناك بالفعل خمس صور لنظرية الأوتار. ولعلك تسترجع أننا قد أطلقنا عليها النموذج I، والنموذجين IIA، IIB، وهيتيروتيك-O (32) (واختصاراً هيتيروتيك-O) وهيتيروتيك $E_8 \times E_8$ (واختصاراً هيتيروتيك-E). وتتشارك جميعها في صفات أساسية كثيرة - فأنساقها الاهتزازية تحدد الكتلة وشحنات القوى المحتملة، وتتطلب وجود ما مجموعه عشرة أبعاد للزمكان، ولابد لأبعادها المتجعدة أن تكون أحد أشكال كالابي - ياو، .. الخ - ولهذا السبب فإننا لم نعر هذه الاختلافات اهتماماً في الفصول السابقة. إلا أن التحاليل التي أجريت في الثمانينيات من القرن العشرين قد أظهرت أن هذه الصور للنظرية مختلفة بالفعل. ويمكنك الاطلاع على المزيد من خواصها في الملاحظات الأخيرة، لكن يكفي أن تعرف أنها تختلف في كيفية تضمينها للتناظر الفائق وفي التفاصيل الهامة لأنساق الاهتزاز التي تعتمد عليها[2].

(2) لنلخص الفرق بين نظريات الأوتار الخمس. وللقيام بذلك نلاحظ أن الحركات الاهتزازية على طول حلقة الوتر يمكن أن تنتقل في اتجاه عقارب الساعة أو ضد عقارب الساعة. وتختلف أوتار النوع IIA عن النوع IIB في أنه في النظرية الأخيرة تتطابق الاهتزازات في اتجاه عقارب الساعة وعكس اتجاه عقارب الساعة، بينما في حالة النظرية الأولى فإنهما عكس بعضهما بالضبط في الشكل. وكلمة "عكس" هنا لها معنى رياضي دقيق في هذا المضمون، غير أنه من السهل أن نفكر فيها من منطلق الحركة المغزلية للأنساق الاهتزازية الناتجة في كل نظرية. وقد اتضح أن الحركة المغزلية لكل الجسيمات في نظرية النوع IIB تقع جميعها في نفس الاتجاه (لها نفس الكفية)، بينما في نظرية النوع IIA تمارس الحركة المغزلية في كلا الاتجاهين (لها كلا الكفيتين). ومع ذلك فإن كل نظرية تتضمن تناظراً فائقاً. أما في حالة النظريتين الهيتيروتيك فإنهما يختلفان بنفس الطريقة لكن بصورة أكثر حدة. ويشبه اهتزاز أوتار كل منهما في اتجاه عقارب الساعة ذلك الموجود في النوع II (وعند التركيز على الدوران في اتجاه عقارب الساعة فقط فإن نظريتي النوعين IIA، IIB تتساويان)، غير أن اهتزازاتهما ضد عقارب الساعة هي تلك الخاصة بنظرية الأوتار البوزونية الأصلية. ومع أنه في الأوتار البوزونية مشاكل يصعب التغلب عليها عند اختيارها لاهتزازات الأوتار في اتجاه عقارب الساعة وضد عقارب الساعة، فقد أظهر كل من دافيد غروس، وجيفري هارفي، وإميل مارتينيك، وريان روم سنة 1985 (وكانوا جميعاً وقتها في جامعة برنستون، وقد أطلق عليهم "رباعي برنستون الوتري")، أظهروا أنه من الممكن أن تنبثق نظرية معقولة للغاية إذا استخدمت نظرية الأوتار البوزونية بالتضافر مع نظريتي النوع II للأوتار. وحقيقةً فإن السمة الغريبة في هذا الاتجاه هي أن النظرية البوزونية تتطلب 26 بعداً للزمكان، بينما فى حالة نظرية الأوتار الفائقة فإن الأمر يتطلب 10 أبعاد فقط للزمكان. وقد تم التوصل لذلك من أبحاث كل من كلود لافليس من جامعة روتجرز سنة 1971، وريتشارد براور من جامعة بوسطن، وبيتر غودارد من جامعة كمبريدج، وتشارلز ثورن من جامعة فلوريدا في جينسفيلد سنة 1972. وهكذا فإن بناء أوتار هيتيروتيك هجين غريب - هيتيروتية Heterosis - يكون للأنساق الاهتزازية ضد اتجاه عقارب الساعة فيها 26 بعداً، بينما الأنساق في اتجاه =

(فللنموذج I من النظرية مثلاً، أوتار مفتوحة أطرافها غير مثبتة بالإضافة إلى الحلقات المغلقة التي ركزنا عليها). كان ذلك أمراً مخجلاً بالنسبة لمنظري نظرية الأوتار، لأنه على الرغم من وجود اقتراح جاد بنظرية موحدة نهائية مؤثرة، فإن وجود خمسة اقتراحات تعرقل تقدم الأمور.

أما الانحراف الثاني عن الحتمية فهو أكثر دقة. وحتى ندركه تماماً، فإن عليك أن تقرّ بأن كل النظريات الفيزيائية تتكون من جزأين. الجزء الأول تجميع للأفكار الأساسية للنظرية، التي يعبر عنها عادة بالمعادلات الرياضية. أما الجزء الثاني للنظرية فيحتوي على حلول هذه المعادلات. وعموماً، فإن لبعض المعادلات حلاً واحداً، وهو الحل الوحيد، بينما للبعض الآخر أكثر من حل (من المحتمل أن تكون هناك حلول كثيرة). (ومثال بسيط على ذلك، حاصل ضرب العدد 2 في عدد ما يعطي ناتج 10، فالإجابة حل واحد هو العدد 5. لكن في المعادلة "حاصل ضرب الصفر في عدد ما يعطي صفراً" له عدد لا نهائي من الحلول، حيث أن حاصل ضرب الصفر في أي عدد يساوي صفراً). وهكذا، وحتى لو أدى البحث إلى نظرية فريدة بمعادلات فريدة، فإن الحتمية قد تنتفي بوجود حلول وسط، لأنه قد يكون للمعادلات حلول كثيرة ممكنة ومختلفة. وبحلول نهاية ثمانينيات القرن العشرين بدا أن هذا هو الوضع بالنسبة لنظرية الأوتار. فعندما درس الفيزيائيون معادلات أية صورة من الصور الخمس لنظرية الأوتار وجدوا أن لها حلولاً كثيرة - فمثلاً هناك طرق عديدة مختلفة تتحد بها الأبعاد الإضافية - ويقابل كل حل عالم له خواص مختلفة. وعلى الرغم من أن معظم هذه العوالم تبدو كحلول صحيحة لمعادلات نظرية الأوتار، إلا أنها تظهر غير متوائمة مع العالم كما نعرفه.

وقد تبدو هذه الانحرافات عن الحتمية كخواص أساسية صادفها سوء الحظ لنظرية الأوتار. غير أن البحوث التي أجريت منذ منتصف تسعينيات القرن العشرين

= عقارب الساعة هناك 10 أبعاد! وقبل أن تقع في حيرة حتى تصل إلى إدراك معقول لهذا الاتحاد المحير، فإن غروس ومعاونيه بينوا أن الأبعاد الستة عشر الزائدة في الجانب البوزوني لا بد وأن تتجعد في شكل من أحد شكلين خاصين جداً من أشكال الدونت (الكعكة) ذات الأبعاد الكثيرة، الأمر الذي يؤدي إلى نظريتي هيتيروتيك -O، وهيتيروتيك -E. وحيث أن الأبعاد الإضافية الستة عشر في الجانب البوزوني متجعدة بصرامة، فإن كل واحدة من هاتين النظريتين تسلك كما لو كان لها 10 أبعاد تماماً كما في حالة النوع II. ومرة أخرى فإن نظريتي هيتيروتيك تتضمنان شكلاً من أشكال التناظر الفائق. وأخيراً فإن نظرية النوع الأول من أقارب نظرية أوتار النوع IIB، إلا أنه بالإضافة إلى الحلقات المغلقة للأوتار التي سبقت الإشارة إليها، فإن لها كذلك أوتاراً حرة النهايات - يطلق عليها "أوتار مفتوحة".

قد أعطت أملاً حاسماً جديداً في أن هذه الصفات قد تكون مجرد انعكاسات للطريقة التي حلل بها المنظرون النظرية. وباختصار فإن معادلات نظرية الأوتار على درجة من التعقيد بحيث لا يعرف أحد صيغتها بالضبط. وقد تمكن الفيزيائيون من وضع الصيغ التقريبية فقط لهذه المعادلات. والصيغ التقريبية هي التي تختلف بوضوح من نظرية للأوتار إلى أخرى. وهي تلك المعادلات التقريبية الموجودة ضمن أية واحدة من النظريات الخمس للأوتار، التي تؤدي إلى عدد هائل من الحلول، أي وفرة من العوالم غير المرغوب فيها.

ومنذ العام 1995 (بداية ثورة الأوتار الفائقة الثانية)، أخذت تتراكم أدلة على أن المعادلات الدقيقة، التي ما زالت صيغتها الصحيحة أبعد عن متناولنا، قد تقوم بحل هذه المشكلات، وبالتالي تساعد في جعل نظرية الأوتار حتمية. وفي الحقيقة، رسخت قناعة أرضت معظم منظري نظرية الأوتار، بأنه عند فهم المعادلات الدقيقة، فإن تلك المعادلات ستظهر أن كل النظريات الخمس للأوتار هي في الواقع مرتبطة بعضها ببعض بصورة حميمة. فهي جميعاً أجزاء لكيان واحد متصل - مثل أطراف نجمة البحر - تخضع خواصه التفصيلية حالياً لدراسة مستفيضة. وبدلاً من وجود خمس نظريات مختلفة للأوتار، فإن الفيزيائيين مقتنعون الآن أن هناك نظرية واحدة تنسج هذه النظريات الخمس في إطار نظري فريد. ومثل الوضوح الذي ينبثق عندما تتكشف العلاقات الدفينة حتى الآن، فإن هذا الاتحاد بين النظريات الخمس يقدم نقطة مفاضلة جديدة وقوية لفهم العالم وفقاً لنظرية الأوتار.

وحتى نشرح وجهات النظر تلك، فإن علينا أن نستخدم بعض أحدث التطورات وأصعبها في نظرية الأوتار. وعلينا أن نفهم طبيعة التقريب المستخدم في دراسة نظرية الأوتار وحدودها الكامنة فيها. وعلينا أن نتعرف أكثر على التقنيات الذكية - والتي تسمى إجمالا الثنائيات - التي استدعاها الفيزيائيون للتغلب على هذه التقريبات. ثم علينا أن نتبع المنطق الدقيق الذي يستفيد من هذه التقنيات لاكتشاف التبصر الذي يؤدي إلى ما ذكرناه. لكن لا تنزعج، فإن الجزء الشاق من العمل قد أجري بالفعل بواسطة منظري نظرية الأوتار، وسنقنع هنا بتفسير نتائجهم.

ومع ذلك، وحيث أن هناك في ما يبدو الكثير من القطع المتفرقة التي يجب تطويرها وجمعها، فإنه في الفصل الحالي يمكن بسهولة أن "تفقد الغابة وأنت تتبع الأشجار"(*). وهكذا إذا شعرت أن المناقشة في هذا الفصل قد أصبحت أعمق من اللازم وأنك مضطر للاندفاع إلى الثقوب السوداء (الفصل 13) أو إلى الكوسمولوجيا

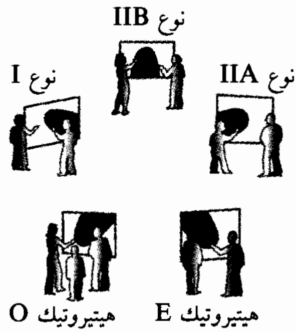
(*) مثل يُضرب لمن تستغرقه التفاصيل فلا يلتفت للكل- الأهم والأكبر (المترجم والمراجع).

(علم الكون - الفصل 14) فما عليك إلا أن تلقي نظرة سريعة على المقطع الآتي الذي يوجز أهم وجهات النظر في ما يتعلق بثورة الأوتار الفائقة الثانية.

أولاً: موجز الثورة الثانية للأوتار الفائقة

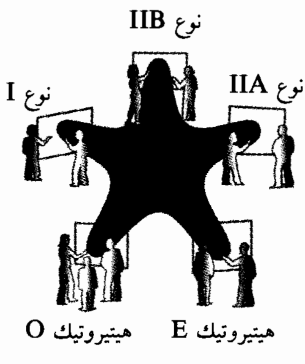
يوجز الشكلان رقما (12-1) و(12-2) النظرة الفاحصة الأولية لثورة الأوتار الفائقة الثانية. فنرى في الشكل رقم (12-1) الوضع قبل المقدرة الحديثة لتخطي (جزئياً) الطرق التقريبية التي استخدمها الفيزيائيون تقليدياً لتحليل نظرية الأوتار.

الشكل رقم (12-1)



اعتقد الفيزيائيون الذين كانوا يدرسون نظريات الأوتار الخمس لسنوات طويلة أنهم يتعاملون مع نظريات منفصلة تماماً.

الشكل رقم (12-2)



أظهرت نتائج الثورة الثانية للأوتار الفائقة أن كل النظريات الخمس للأوتار هي في الواقع أجزاء من إطار مفرد موحد، أطلق عليه مؤقتاً نظرية-M.

ونرى هنا أن النظريات الخمس للأوتار منفصلة تماماً بعضها عن بعض. ولكن بواسطة الأفكار التي اكتشفت أخيراً وانبثقت من البحوث الحديثة، كما يتضح من الشكل رقم (12-2)، فإننا نرى، كما في الأذرع الخمسة لنجم البحر، أن كل نظريات الأوتار ينظر إليها كنظرية واحدة متشابكة في إطار مشترك. (وفي الحقيقة، وبنهاية الفصل الحالي سنرى نظرية سادسة - ذراعاً سادسة - ستندمج في هذا الاتحاد). وقد أطلق على هذا الإطار القوي مؤقتاً اسم نظرية-M، لأسباب ستتضح مع تقدمنا في الكتاب. ويمثل الشكل رقم (12-2) علامة مميزة على طريق الإنجازات في ما يتعلق بالنظرية النهائية. أصبحت الخيوط المتقطعة ظاهرياً في نظرية الأوتار وكأنها قد نسجت مع بعضها الآن في سجادة مفردة وفريدة متضمنة كل النظرية التي بحثنا عنها لزمن طويل، نظرية كل شيء.

ومع أن هناك الكثير الذي ما زال لم ينجز بعد، إلا أن هناك سمتين أساسيتين لنظرية-M قد كشف عنهما الفيزيائيون. الأولى، أن لنظرية-M أحد عشر بعداً (عشرة أبعاد فضائية وواحد زماني). ويشبه الأمر بعض الشيء ما وجده كالوزا عند إضافة بعد فضائي يسمح بالاندماج غير المتوقع للنسبية العامة والكهرومغناطيسية، فقد أيقن منظرو نظرية الأوتار أنه بإضافة بعد فضائي إلى نظرية الأوتار - بخلاف الأبعاد التسعة الفضائية والبعد الزماني التي نوقشت في الفصول السابقة - سيسمح بالتوصل إلى كل الصور الخمس للنظرية بشكل مقنع تماماً. والأكثر من ذلك، فإن هذا البعد الفضائي الإضافي لم يأت من فراغ، والأحرى أن منظري نظرية الأوتار قد أدركوا أن الأسباب التي قادتهم في سبعينيات وثمانينيات القرن العشرين لاكتشاف بعد زماني واحد وتسعة أبعاد فضائية، كانت تقريبية، وأن الحسابات الدقيقة التي أصبح من الممكن إجراؤها الآن قد أظهرت أنهم قد أغفلوا حتى هذه اللحظة بعداً فضائياً آخر.

أما السمة الثانية التي اكتشفت لنظرية-M، فهي أنها تحتوي على أوتار متذبذبة، لكنها تحوي كذلك أشياء أخرى: أغشية ثنائية الأبعاد متذبذبة، وبقعاً ثلاثية الأبعاد متأرجحة (تسمى الأغشية الثلاثية Three-Branes)، وحزمة من مكونات أخرى كذلك. وتظهر هذه السمة من سمات نظرية-M، كما في حالة البعد الحادي عشر، عندما تتحرر الحسابات من الاعتماد على التقريب المستخدم قبل منتصف تسعينيات القرن العشرين.

وعدا هذه السمات ومجموعة من الأفكار التي تم التوصل إليها في السنوات القليلة الماضية، فإن الكثير عن حقيقة نظرية-M ما زال غامضاً - وأحد المعاني المقترحة لـ "M". ويعمل الفيزيائيون في جميع أنحاء العالم بكل جهد للتوصل

إلى إدراك كامل لنظرية-M، وقد يكون عملهم هذا هو الذي سيشكل المعضلة المركزية لفيزياء القرن الواحد والعشرين.

ثانياً: طريقة تقريبية

ترتبط حدود الطرق التي دأب الفيزيائيون على استخدامها في تحليل نظرية الأوتار بما يسمى "نظرية الاضطراب". ونظرية الاضطراب اسم توضيحي لإجراء التقريب أثناء محاولة التوصل إلى إجابة تقريبية عن أحد الأسئلة، ثم يعقب ذلك بطريقة منهجية تحسين لهذا التقريب بالفحص الأدق للتفاصيل الصغيرة التي أهملت في البداية. وقد لعبت نظرية الاضطراب دوراً هاماً في مجالات عديدة من البحث العلمي، وكانت عنصراً أساسياً في فهم نظرية الأوتار، وكما سنوضح الآن فإنها تمثل كذلك شيئاً نتعامل معه كثيراً في حياتنا اليومية.

تخيل أن سيارتك أخذت يوماً ما تتعثر في أدائها وأنك أخذتها إلى الميكانيكي لفحصها. وبعد إلقاء نظرة على سيارتك، يخبرك الميكانيكي بالأخبار السيئة: فالسيارة تحتاج إلى محرك جديد، وسيكلفك هذا الجزء وأجر الميكانيكي حوالى 900 دولار وهذا المبلغ تقريبي ومن المتوقع أن تعرف المبلغ بالضبط بعد أن تتضح تفاصيل العمل المطلوب. وبعد بضعة أيام وبعد إجراء الاختبارات اللازمة على السيارة يعطيك الميكانيكي تقديراً أكثر دقة للتكلفة هو 950 دولاراً. وقد فسر الميكانيكي ذلك بأنك تحتاج كذلك إلى منظم جديد سيكلفك مع تركيبه حوالى 50 دولار. وأخيراً، عندما تذهب لإحضار سيارتك، وبعد أن قام الميكانيكي بتجميع كل المصروفات، فإنه قدم لك فاتورة بمبلغ 984.93 دولاراً. وهو يفسر ذلك كالآتي: 950 دولاراً للموتور والمنظم، و27 دولاراً إضافية لسير المروحة، وعشرة دولارات لضفيرة البطارية، و99 سنتاً لصمولة معزولة كهربياً. وهكذا تم تدقيق الرقم التقريبي الأول 900 دولار بتضمينه تفاصيل أكثر وأكثر. وبمصطلحات الفيزياء فإن هذه التفاصيل يشار إليها بأنها "اضطرابات" بالنسبة للتقدير المبدئي.

وعندما تطبق نظرية الاضطراب في موضعها وبكفاءة، فإن التقدير المبدئي سيكون قريباً بشكل معقول من النتيجة النهائية، فالتفاصيل الدقيقة التي أهملت في التقدير المبدئي لن تؤدي إلى فروق كبيرة عند تضمينها في نظرية الاضطراب. لكن في بعض الأحيان عندما تذهب لدفع الفاتورة النهائية قد تجد اختلافاً مذهلاً عن التقدير المبدئي. ومع أنك قد تستخدم مصطلحات أكثر انفعالاً، فإن ذلك يسمى فنياً فشل نظرية الاضطراب. ويعني ذلك أن التقريب المبدئي لم يكن دليلاً جيداً

للإجابة النهائية لأنه بدلاً من أن تؤدي "التحسينات" إلى انحرافات صغيرة، فإنها جاءت بتغييرات كبيرة إلى التقدير التقريبي.

وكما أشرنا بإيجاز في الفصول السابقة، فإن مناقشاتنا لنظرية الأوتار حتى الآن قد اعتمدت على منطق اضطرابي بعض الشيء مشابه لما استخدمه الميكانيكي. و"للفهم المنقوص" لنظرية الأوتار، الذي أشرنا إليه أحياناً، جذور بشكل أو بآخر في طريقة التقريب. ولنبدأ خطوة خطوة في فهم هذه الملحوظة الهامة، وذلك بمناقشة نظرية الاضطراب في مضمون أقل تجريداً لنظرية الأوتار، لكنه أقرب في التطبيق لنظرية الأوتار عن مثال الميكانيكي.

ثالثاً: مثال كلاسيكي على نظرية الاضطراب

يقدم فهم حركة الأرض في المجموعة الشمسية مثالاً كلاسيكياً لاستخدام مقاربة الاضطراب. وفي حالة المسافات الشاسعة بهذا الشكل لا نأخذ في اعتبارنا إلا قوى الجاذبية، إلا إذا كان الأمر يتطلب تقريباً أكثر من ذلك، فإن المعادلات التي سنتعامل معها ستكون في غاية التعقيد. ولتتذكر أنه وفقاً لكل من نيوتن وآينشتاين، فإن كل شيء يبذل تأثيراً للجاذبية في كل شيء آخر، الأمر الذي يؤدي مباشرة إلى شد وجذب معقد يصعب تتبعه رياضياً ويتضمن الأرض والشمس والقمر والكواكب، وجميع الأجرام السماوية الأخرى من ناحية المبدأ. وكما نتصور فإن من المستحيل أن نأخذ كل هذه التأثيرات في الاعتبار ونعيّن الحركة الدقيقة للأرض. وفي الواقع، فإنك حتى لو استخدمت ثلاثة أجرام سماوية فإن المعادلات تصبح على درجة من التعقيد بحيث لم يتمكن أحد من حلها بشكل كامل[3].

ومع ذلك، من الممكن أن نتنبأ بحركة الأرض في المجموعة الشمسية بدقة كبيرة باستخدام منطلق الاضطراب. والكتلة الهائلة للشمس، مقارنة بأي عضو آخر في المجموعة الشمسية، وقربها من الأرض إذا قورنت ببعدها عن أي نجم آخر، يجعلانها المؤثر السائد في حركة الأرض بشكل كبير. وهكذا يمكن أن نتوصل إلى

(3) عندما نتحدث عن الإجابات "الدقيقة" في هذا الفصل، مثل الحركة "الدقيقة" للأرض، فإننا نعني في الواقع التنبؤ الدقيق لبعض القيم الفيزيائية "في إطار نظري معين ومختار". وحتى نتوصل إلى النظرية النهائية - ربما نكون قد توصلنا إليها الآن، أو ربما لن نتوصل إليها أبداً - فإن كل نظرياتنا ستكون مجرد تقريب للواقع. غير أن هذا المفهوم عن التقريب ليس له علاقة بمناقشاتنا في هذا الفصل. فنحن هنا مهتمون، في إطار نظرية مختارة، بحقيقة أنه من الصعب غالباً بل ربما من المستحيل استخلاص التنبؤات الدقيقة الناتجة من النظرية. وبدلاً من ذلك، فإن علينا أن نستخلص مثل هذه التنبؤات مستخدمين طرقاً تجريبية مؤسسة على منطلق اضطرابي.

تقدير تقريبي آخذين في الاعتبار تأثير جاذبية الشمس فقط. وهذا مناسب تماماً لعدة أسباب. فإذا استدعت الضرورة، يمكن تنقيح هذا التقريب وذلك بإدخال تأثير الجاذبية للأجرام المجاورة للأرض بالتدريج، مثل القمر وأي كواكب تمر بالقرب منها في تلك اللحظة. وتبدأ الحسابات في التعقيد كلما زادت شبكة تأثيرات الجاذبية تعقيداً، لكن لا تدع هذا الأمر يطمس فلسفة الاضطراب: فتبادل الجاذبية بين الشمس والأرض يعطينا تفسيراً تقريبياً لحركة الأرض، بينما تقدم التأثيرات الأخرى للجاذبية سلسلة من التنقيحات أصغر فأصغر.

ويصلح المنطلق الاضطرابي في هذا المثال لوجود تأثير فيزيائي سائد يسمح بوصف نظري بسيط نسبياً. وليس هذا هو الحال دائماً. فمثلاً إذا كنا نتناول حركة ثلاثة نجوم كتلتهما متقاربة تدور بعضها حول بعض في نظام مثلثي، ولا يوجد هناك علاقة جاذبية مفردة لها تأثير يقزِّم النجمين الآخرين. وبالتالي لا يوجد هناك تداخل مفرد سائد يزودنا بالتقدير التقريبي، بينما يعطي الآخران تأثيرات تؤدي إلى تنقيحات صغيرة. فإذا حاولنا مثلاً استخدام المنطلق الاضطرابي بعزل الشد الجاذب بين نجمين واستخدامه في التقريب، فسرعان ما سنجد أن هذا المنطلق سيفشل. وستكشف حساباتنا أن التنقيحات التي أجريت على الحركة التي نتنبأ بها نتيجة تضمين النجم الثالث، ليست صغيرة، بل في الواقع هي في حجم التقريبات المفترضة. وهذا أمر مألوف: فحركة ثلاثة أشخاص يرقصون رقصة الدببة (Bora Bears) لا تشبه حركة اثنين يرقصان رقصة التانغو إلا بالكاد. وتعني التنقيحات الكبيرة أن التقريب المبدئي كان بعيدا جداً عن الواقع وأن كل العملية كانت مثل بيوت واهية مبنية على الرمال. ولابد من الإشارة إلى أن الأمر ليس مجرد تضمين تنقيحات كبيرة ناتجة من وجود النجم الثالث. ويشبه الأمر هنا قطع الدومينو التي يعتمد بعضها على بعض: فالتنقيحات الكبيرة لها تأثير واضح على حركة النجمين الآخرين، التي بدورها لها تأثير كبير على حركة النجم الثالث، والذي بدوره له تأثير محسوس على النجمين الآخرين، وهكذا. وكل الجدائل في شبكة الجاذبية

الشكل رقم (12-3)



تداخل الأوتار بالالتحام والانشطار.

لها نفس الأهمية ويجب التعامل معها آنياً. وفي أغلب الأوقات وفي مثل هذه الحالة، فإن منهجنا الوحيد هو الاستفادة من المقدرة الجبارة للكمبيوتر لمحاكاة الحركة الناتجة.

ويلقي هذا المثال الضوء على أهمية تحديد ما إذا كان التقدير التقريبي المقترح قريباً من الحقيقة عند تطبيق منطلق الاضطراب، وإذا كان الأمر كذلك، فأي التفاصيل الدقيقة وكم منها يجب تضمينها للتوصل إلى مستوى الدقة المطلوب. وكما نتناول الأمر الآن، فإن هذه المَوضوعات بالتحديد لها أهمية قصوى عند تطبيق أدوات الاضطراب في العمليات الفيزيائية للعالم الميكروي.

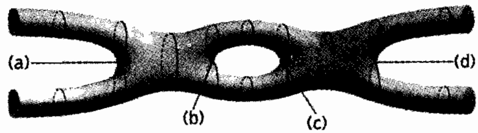
رابعاً: المقاربة الاضطرابية لنظرية الأوتار

تبنى العمليات الفيزيائية على التداخلات الأساسية بين الأوتار المتذبذبة. وكما ناقشنا في آخر الفصل السادس(*)، فإن هذه التداخلات تتضمن انشطار وارتباط حلقات الأوتار كما في الشكل رقم (6-7)، التي أعدناها في الشكل رقم (12-3) لمساعدة القارئ. وقد بين منظرو نظرية الأوتار كيف يمكن لمعادلة رياضية دقيقة أن ترتبط بالرسم التخطيطي للشكل رقم (12-3) - المعادلة التي تعبر عن تأثير كل وتر يستجد في حركة الوتر الآخر. (وتختلف تفاصيل المعادلة في نظريات الأوتار الخمس، لكننا سنهمل في الوقت الحالي مثل هذه الاختلافات الدقيقة) ولولا ميكانيكا الكم لكانت هذه المعادلة هي نقطة النهاية في رواية كيفية تداخل الأوتار. غير أن الجيشان المجهري المفروض بواسطة مبدأ عدم التيقن يعني أن أزواج الأوتار/ الأوتار المضادة (وتران يمارسان انساقاً اهتزازية مضادة) يمكن أن تتواجد لحظياً، مستدينة طاقة من الكون، وحيث أنهما يلاشيان أحدهما الآخر بسرعة كافية، وبالتالي فإنهما يعيدان دين الطاقة. ومثل هذه الأزواج من الأوتار التي تنتج عن الجيشان الكمي وتعيش على الطاقة المستدانة، وبالتالي عليها أن تتحد بسرعة في حلقة مفردة، تعرف باسم "زوج الأوتار الافتراضي". وعلى الرغم من أن وجود هذه الأزواج وقتي، إلا أن الوجود العابر لهذه الأزواج الافتراضية الإضافية بين الأوتار يؤثر في الخواص التفصيلية للتداخل.

وقد مثلنا هذه العملية برسم تخطيطي في الشكل رقم (12-4). يصطدم الوتران الأصليان ويرتبطان بعنف عند النقطة (a)، حيث يندمجان في حلقة مفردة.

(*) قد يجد القراء الذين أهملوا قراءة مقطع "الإجابة الأكثر دقة" من الفصل السادس، أنه من المفيد أن يطلعوا على الجزء الأول من هذا المقطع [المؤلف].

الشكل رقم (12-4)



يمكن أن يتسبب الجيشان الكمي في نشوء أزواج وتر/وتر مضاد (b) والتلاشي (c) مؤدياً إلى تداخل أكثر تعقيداً.

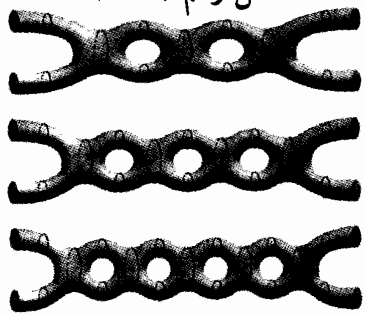
ترتحل هذه الحلقة مسافة صغيرة، غير أنه عند النقطة (b) تؤدي تأرجحات الجيشان الكمي إلى تكوين زوج أوتار افتراضي ينتقل مسافة ما ثم يتلاشى عند النقطة (c) منتجاً مرة أخرى وتراً واحداً. وأخيراً وعند النقطة (d) يفقد هذا الوتر طاقته بالتفكك إلى زوج من الأوتار تتحرك في اتجاهات جديدة. ويطلق الفيزيائيون على هذه العملية عملية "الوتر الواحد" وذلك بسبب وجود الحلقة المفردة في مركز الشكل رقم (12-4). وكما في حالة التداخل الذي تخيلناه في الشكل رقم (12-3)، من الممكن ربط معادلة رياضية دقيقة بهذا الشكل لنوجز تأثير زوج الأوتار الافتراضي في حركة الوترين الأصليين.

لكن هذه ليست نهاية القصة لأن الاضطراب الكمي يمكن أن يسبب النشوء اللحظي للأوتار الافتراضية أي عدد من المرات، منتجاً سلسلة من أزواج الأوتار الافتراضية. ويؤدي ذلك إلى أشكال ذات حلقات أكثر وأكثر كما هو موضح في الشكل رقم (12-5). ويقدم كل من هذه الأشكال طريقة بسيطة وسهلة لتصور العمليات الفيزيائية المعنية: تندمج الأوتار القادمة معاً ويتسبب الاضطراب الكمي في إنتاج الحلقات التي تنشطر بدورها إلى أزواج افتراضية من الأوتار، ثم تنتقل هذه الأزواج ليُلاشي أحدهما الآخر بواسطة الاندماج مرة أخرى في حلقة مفردة تنتقل لتنتج زوجاً آخر من الأوتار الافتراضية، وهكذا. وكما في حالة الأشكال الأخرى، هناك معادلة رياضية تقابل كل عملية من هذه العمليات، وهي توجز التأثير في حركة الأزواج الأصلية من الأوتار(4).

والأكثر من ذلك، وتماماً كما في حالة الميكانيكي الذي حدد التكاليف النهائية لإصلاح سيارتك من خلال تنقيح التقدير المبدئي وقيمته 900 دولار بإضافة 50 دولاراً، و27 دولاراً، وعشرة دولارات، و93 سنتاً؛ وتماماً كما توصلنا إلى

(4) هذه الأشكال صور لنظرية الأوتار وتسمى أشكال فينمان، المبتكرة بواسطة ريتشارد فينمان لإجراء الحسابات الاضطرابية في نظرية مجال الكم للجسيمة النقطة.

الشكل رقم (12-5)

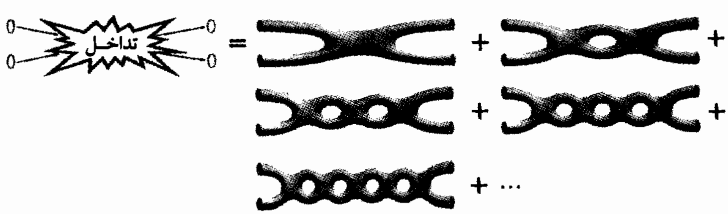


يمكن للجيشان الكمي أن يتسبب في نشوء العديد من متواليات أزواج الأوتار/الأوتار المضادة وكذلك التلاشي.

فهم متنامي الدقة لحركة الأرض من خلال تنقيح تأثير الشمس بتضمين التأثيرات الأصغر للقمر والكواكب الأخرى، فإن منظري نظرية الأوتار قد بينوا أنه من الممكن فهم التداخل بين وترين بواسطة إضافة كل من التعبيرات الرياضية للأشكال التي بلا حلقات (لا يوجد بها أزواج أوتار افتراضية)، وتلك التي لها حلقة واحدة (زوج واحد من الأوتار الافتراضية)، وذات الحلقتين (زوجان من الأوتار الافتراضية) وهكذا دواليك، كما هو موضح في الشكل رقم (12-6).

تتطلب الحسابات الدقيقة أن نضيف معاً التعبيرات الرياضية المصاحبة لكل من هذه الأشكال، والتي لها أعداد متزايدة من الحلقات. وحيث أن هناك عدداً لانهائياً من مثل تلك الأشكال، وأن الحسابات الرياضية المصاحبة لكل منها تصبح متزايدة الصعوبة كلما زاد عدد الحلقات، فإن هذه مهمة مستحيلة. وبدلاً من ذلك قام منظرو نظرية الأوتار بصياغة هذه الحسابات في إطار اضطرابي مبني على

الشكل رقم (12-6)



محصلة تأثير كل وتر قادم في الآخر تأتي من إضافة التأثيرات التي تتضمن أشكالاً لها حلقات متزايدة.

توقعهم بأن التقدير التقريبي المعقول ينتج عن البدء بعمليات بلا حلقات (Zero-loop)، وأن الأشكال ذات الحلقات تنتج بعد ذلك كتنقيحات تقل أهميتها كلما زاد عدد الحلقات.

وفي الحقيقة، وكل ما نعرفه تقريباً عن نظرية الأوتار - بما في ذلك الكثير مما تناولناه في الفصول السابقة - قد تم اكتشافه بواسطة الفيزيائيين الذين استخدموا حسابات تفصيلية وتوضيحية مطبقين هذا المنطلق الاضطرابي. وحتى نثق في دقة النتائج التي توصلنا إليها، فإن على المرء أن يحدد ما إذا كان التقريب المفترض، الذي أهمل كل الرسوم في الشكل رقم (12-6) ما عدا عدد قليل من أوائلها، يقع بالفعل فى الإطار المفترض. ويؤدي بنا ذلك إلى السؤال الهام: هل نحن في إطار التقريب السليم؟

خامساً: هل التقريب في الحدود المناسبة؟

يتوقف الأمر على الآتي. بالرغم من أن المعادلة الرياضية المتعلقة بكل رسم تصبح معقدة جداً كلما زاد عدد الحلقات، إلا أن منظري نظرية الأوتار قد تعرفوا على سمة أساسية وضرورية. وبشكل ما، وكما تحدد قوة الحبل مدى تحمله للشد حتى ينقطع إلى نصفين، هناك عدد يحدد ميل التأرجحات الكمية التي تتسبب في انقسام الوتر إلى اثنين لحظياً منتجاً زوجاً فعلياً. ويعرف هذا العدد بـ "ثابت ازدواج الوتر" (String Coupling Constant) (وبشكل أكثر دقة، فإن لكل نظرية من نظريات الأوتار الخمس ثابتاً لازدواج الوتر خاصاً بها، كما سنشرح حالاً). والمصطلح معبر تماماً: فقيمة ثابت ازدواج الوتر تحدد قوة علاقة الجيشان الكمي لثلاثة أوتار (الحلقة الأصلية والحلقتان الفعليتان الناتجتان من انشطار هذه الحلقة) - أي مدى قوة ارتباطهما معاً. وتبين العمليات الحسابية أنه كلما ازدادت قيمة ثابت ازدواج الوتر كلما زاد ميل الجيشان الكمي لإحداث انشطار للوتر الأصلي (وبالتالي إعادة الارتباط)؛ وكلما قلت قيمة ثابت ازدواج الوتر، قلت فرصة ميل الجيشان الكمي لنشوء الأوتار الافتراضية لحظياً.

وسنتناول حالاً مسألة تحديد قيمة ثابت ازدواج الوتر ضمن أية نظرية من نظريات الأوتار الخمس، لكن دعنا أولاً نفسر ما نعنيه فعلاً بكلمة "صغير" أو "كبير" عندما نتناول قيمته؟ حسناً، تبين الرياضيات التي تقوم عليها نظرية الأوتار أن الخط الفاصل بين "صغير" و"كبير" هو العدد 1، كما سنوضح في ما يلي. فإذا كانت قيمة ثابت ازدواج الوتر أقل من 1، فإن أعداداً أكبر من أزواج الأوتار الافتراضية سيقل ميلها للنشوء اللحظي - مثل احتمالات الإصابة المتكررة

بالصواعق. أما إذا كان ثابت ازدواج الوتر مساوياً لـ 1 أو أكثر، فمن المرجح أن أعداداً أكبر من مثل هذه الأزواج الافتراضية ستظهر باندفاع لحظياً على الساحة[5]. وخلاصة القول أنه إذا كان ثابت ازدواج الوتر أقل من 1، فإن مساهمات شكل الحلقة تتناقص باطراد كلما زاد عدد الحلقات. وهذا بالضبط ما يحتاجه الإطار الاضطرابي، حيث يشير ذلك إلى أننا سنحصل على نتائج دقيقة بصورة معقولة حتى لو أهملنا كل العمليات ما عدا تلك التي لها عدد قليل من الحلقات. أما إذا لم يكن ثابت ازدواج الوتر أقل من 1، فإن مساهمات رسوم الحلقة تصبح أكثر أهمية كلما زاد عدد الحلقات. وكما في حالة نظام من ثلاثة نجوم فإن ذلك يتسبب في فشل منطلق الاضطراب. وهكذا فإن التقريب المقترح - العملية التي ليس بها حلقات - ليس مناسباً. (ينطبق هذا النقاش بنفس الدرجة على كل نظرية من نظريات الأوتار الخمس - حيث تحدد قيمة ثابت ازدواج الوتر في أية نظرية كفاءة طريقة التقريب الاضطرابي).

ويؤدي بنا هذا الإدراك إلى السؤال المحوري التالي: ما هي قيمة ثابت ازدواج الوتر (أو بشكل أكثر دقة، ما هي قيمة ثابت ازدواج الوتر في كل نظرية من نظريات الأوتار الخمس؟) "وحتى الآن لم يستطع أحد أن يجيب عن هذا السؤال" وهذا واحد من أهم الموضوعات التي لم تلق حلاً في نظرية الأوتار حتى الآن. ولنا أن نتأكد أن الاستنتاجات المبنية على الإطار الاضطرابي صحيحة فقط إذا كان ثابت ازدواج الوتر أقل من 1. والأكثر من ذلك، فإن القيمة الدقيقة لثابت ازدواج الوتر لها تأثير مباشر في الكتلة وفي الشحنات التي تحملها الأنساق الاهتزازية المتنوعة للأوتار. وهكذا، نرى أن الكثير في الفيزياء يتعلق بقيمة ثابت ازدواج الوتر. ولنلق نظرة عن قرب على التساؤل الهام: لماذا ظلت مشكلة قيمة هذا الثابت غير محلولة حتى الآن - في أية نظرية من نظريات الأوتار الخمس.

سادساً: معادلات نظرية الأوتار

يمكن استخدام المنطلق الاضطرابي لتحديد كيفية تداخل الأوتار بعضها مع بعض وكذلك في تحديد المعادلات الأساسية في نظرية الأوتار. وخلاصة القول،

(5) وبصورة أكثر دقة، فإن كل زوج افتراضي من الأوتار، أي كل حلقة في أي شكل تساهم - ضمن أمور معقدة أخرى - بعامل تضاعفي في ثابت ازدواج الوتر. وتؤدي الزيادة في الحلقات إلى معاملات أكثر لثابت ازدواج الوتر. فإذا كان ثابت ازدواج الوتر أقل من 1، فإن المضاعفات المتكررة تؤدي إلى تناقص في هذا الثابت، أما إذا كان الثابت 1 أو أكبر، فإن المضاعفات المتكررة تؤدي إلى مساهمة بنفس المقدار أو أكبر.

تحدد معادلاتُ نظرية الأوتار كيف تتداخل الأوتار، وبالعكس تحدد طريقةُ تداخل الأوتار معادلاتِ النظرية.

وكمثال أولي، هناك معادلة في كل نظرية من نظريات الأوتار الخمس معنية بتحديد قيمة ثابت الازدواج في هذه النظرية. وحالياً لم يتمكن الفيزيائيون إلا من إيجاد تقريب لهذه المعادلة، في كل نظرية من نظريات الأوتار الخمس، وذلك بالتقويم الرياضي لعدد صغير من أشكال الأوتار المناسبة باستخدام المنطلق الاضطرابي. وفي ما يلي ما تقول به المعادلات التقريبية: في أية نظرية من النظريات الخمس يتخذ ثابت ازدواج الوتر قيمة إذا ضربت في الصفر فالناتج صفر. وهذه معادلة محبطة بشكل رهيب؛ حيث أن ضرب أي عدد في الصفر سيعطي الصفر، وبذا فإن حل المعادلة يمكن أن يتم باستخدام أية قيمة لثابت ازدواج الوتر. وهكذا، فإن المعادلة التقريبية - في أية نظرية من نظريات الأوتار الخمس - لثابت ازدواج الوتر لا تقدم أية معلومات عن قيمته.

وحيث أننا ما زلنا في الموضوع، فإن هناك معادلة أخرى في كل نظرية من النظريات الخمس، التي من المفترض أنها تحدد الشكل الدقيق لكل من الأبعاد الممتدة والمتجعدة للزمكان. والصيغة التقريبية لهذه المعادلة، التي نتناولها الآن، أكثر تحديداً بكثير من تلك المتعلقة بثابت ازدواج الوتر، غير أنها ما زالت تسمح بعديد من الحلول. وعلى سبيل المثال، فإن أربعة أبعاد زمكانية ممتدة مع أية ستة أشكال من أشكال كالابي-ياو متجعدة الأبعاد تؤدي إلى فصيل كامل من الحلول، ولكن حتى هذا لا يستنفد كل الحلول، وهو ما يسمح كذلك بالفصل بين عدد الأبعاد الممتدة والأبعاد المتجعدة(6).

ما الذي يمكن استنتاجه من هذه النتائج؟ هناك ثلاثة احتمالات. الأول، ولنبدأ بالاحتمال الأكثر تشاؤماً، ومع أن كل نظرية من نظريات الأوتار تجيء مزودة بمعادلات تحدد قيمة ثابت الازدواج الخاص بها، كما تحدد نظام أبعادها والشكل الهندسي الدقيق للزمكان - الأمر الذي لا تدعيه أية نظرية أخرى - وحتى إذا لم تكن الصيغة الدقيقة لهذه المعادلات معروفة بعد، إلا أنها تتيح عدداً أكبر من الحلول، مما يضعف مقدرتها على التنبؤ بشكل كبير. وإذا كان ذلك صحيحاً

(6) بالنسبة للقارئ ذي الميول الرياضية، نشير إلى أن المعادلة تنص على أن الزمكان لا بد أن يسمح بـ Ricci-Flat Metric. فإذا شطرنا الزمكان إلى ناتج ديكارتي لزمكان مينكوفسكي رباعي الأبعاد، وفضاء كوهلر المنضغط سداسي الأبعاد، فإن Ricci-Flatness سيكافئ الأخير حيث أنه مخروط كالابي-ياو. وهذا هو السبب في أن أشكال كالابي-ياو تلعب مثل هذا الدور الهام في نظرية الأوتار.

فإنه نكسة، لأن ما وعدت به نظرية الأوتار هو إيجاد تفسير لسمات الكون هذه بدلاً من أن تتطلب منا تحديدها من المشاهدات التجريبية، ثم إدخالها اختيارياً بطريقة أو بأخرى في كيان النظرية. وسنعود لهذا الاحتمال في الفصل 15. أما الاحتمال الثاني فيتعلق بالمرونة غير المطلوبة في المعادلات التقريبية للأوتار التي قد تكون مؤشراً على خطأ طفيف في المنطق الذي تعاملنا به. ونحن نبذل المحاولات لاستخدام المنطلق الاضطرابي لتحديد قيمة ثابت ازدواج الأوتار نفسه. ولكن، كما سبق أن شرحنا فإن الطرق الاضطرابية تصبح ذات قيمة فقط إذا كان ثابت الازدواج أقل من الواحد الصحيح، وبالتالي فإن حساباتنا تكون قد وضعت افتراضاً في غير محله في ما يخص إجابتها - وبالتحديد ستكون النتيجة أقل من 1. وقد يشير هذا الفشل إلى خطأ ذلك الافتراض ، وربما يكون ثابت الازدواج في أية نظرية من نظريات الأوتار الخمس أكبر من 1. والاحتمال الثالث هو أن المرونة غير المطلوبة ترجع إلى استخدامنا للمعادلات التقريبية بدلاً من المعادلات الدقيقة. ومثلاً، حتى لو كان ثابت الازدواج في نظرية معينة من نظريات الأوتار أقل من 1 ، فإن معادلات النظرية قد تظل معتمدة على المساهمات من "كل" الأشكال. ويعني ذلك أن التنقيحات الصغيرة المتراكمة من الأشكال ذات الحلقات المتزايدة قد تتسبب في تعديل أساسي في المعادلات التقريبية - الأمر الذي يسمح بوجود حلول كثيرة - لتصبح معادلات دقيقة ذات مقدرة أكبر على التحديد.

بناءً على ما جاء به الاحتمالان الأخيران، وفي بداية تسعينيات القرن العشرين، أيقن معظم منظري نظرية الأوتار أن الاعتماد التام على الإطار الاضطرابي كان عائقاً في طريق تقدم النظرية. والتقدم التالي المطلوب الذي يتفق عليه معظم العاملين في هذا المجال يتطلب منطلقاً غير اضطرابي - المنطلق الذي لا يلتزم بتقنية الحسابات التقريبية، وبالتالي يمكن أن يصل إلى حدود أبعد كثيراً من الإطار الاضطرابي. وحتى العام 1994، كان إيجاد مثل هذه الطريقة يبدو أملاً كاذباً. لكن أحياناً تتحول الآمال الكاذبة إلى واقع.

سابعاً: الثنائية

يجتمع المئات من منظري نظرية الأوتار من جميع أنحاء العالم سنوياً في مؤتمر مخصص ليستعرضوا إنجازات العام المنصرم، وليقوّموا العائد النسبي لاتجاهات البحث المحتملة المتنوعة. ويمكن عادةً التنبؤ بمستوى الاهتمام والإثارة في ما بين المؤتمرين، الأمر الذي يتوقف على مدى التقدم الذي أحرز في ذلك العام. وفي منتصف ثمانينيات القرن العشرين، وفي أوج ثورة الأوتار الفائقة الأولى

كانت الاجتماعات مليئة بفرح لامحدود. وكان لدى الفيزيائيين آمال عريضة أنهم سيفهمون نظرية الأوتار فهماً تاماً في فترة وجيزة، وأنهم سيكتشفون أنها النظرية النهائية الحتمية للكون. وإذا استرجعنا ذلك الآن سنشعر أنه كان أمراً ساذجاً. وقد أظهرت السنوات بعد ذلك أن هناك الكثير من الأمور العميقة والدقيقة في نظرية الأوتار التي ستتطلب بدون شك جهوداً مركزة وطويلة لفهمها. وقد أدت التوقعات غير الواقعية إلى التراجع؛ وذلك عندما لم تتفق النظرية مع كل الأمور، وعندها أصيب الكثير من الباحثين بالاكتئاب. وقد عكست مؤتمرات الأوتار التي أقيمت في أواخر ثمانينيات القرن العشرين المستوى المتدني لإزالة الوهم - قدم الفيزيائيون نتائج مثيرة لكن المناخ وقتها لم يكن ملهماً، لدرجة أن بعضهم اقترح وقف إقامة المؤتمرات السنوية الخاصة بالأوتار. لكن الأمور أخذت تزدهر في بداية تسعينيات القرن العشرين. ومن خلال الإنجازات المفاجئة، التي ناقشنا بعضها في الفصول السابقة، كانت نظرية الأوتار تستعيد نشاطها، وبدأ الباحثون يستعيدون حماسهم وتفاؤلهم. لكن القليل فقط هو الذي بدأ يظهر أثناء مؤتمر الأوتار الذي أقيم في مارس 1995 بجامعة جنوب كاليفورنيا.

عندما جاء دور إدوارد ويتن للكلام في هذا المؤتمر توجه إلى المنصة وألقى محاضرة أشعلت فتيل ثورة الأوتار الفائقة الثانية. أعلن ويتن استراتيجية حول تجاوز المنطلق الاضطرابي في نظرية الأوتار مستلهماً في ذلك الأبحاث السابقة لكل من دوف وهول وتاونسند ، ووجهات نظر شوارتز، والفيزيائي الهندي آشوك سين وآخرين. وكان مفهوم الثنائية يمثل الجزء الرئيسي في خطته.

يستخدم الفيزيائيون مصطلح "الثنائية" لوصف النماذج النظرية التي تبدو كأنها متباينة. إلا أنه يمكن إثبات أنها تصف بالضبط نفس الفيزياء. وهناك أمثلة عادية للثنائية التي تبدو فيها النظريات مختلفة ظاهرياً لكنها في الواقع واحدة، وتظهر متباينة فقط للطريقة التي اتفق أن عرضت بها. وبالنسبة لشخص لا يعرف إلا الإنكليزية فإن النسبية العامة لآينشتاين لا يمكنه التعرف عليها إذا كانت مكتوبة باللغة الصينية. أما إذا كان هذا الفيزيائي ملماً تماماً باللغتين فمن السهل عليه ترجمتها من لغة إلى أخرى مبيناً بذلك تساويهما. وقد أطلقنا على هذا المثال صفة "عادي"، لأننا لم نكتسب أي شيء من هذه الترجمة من وجهة نظر الفيزياء. وإذا كان شخص ما يجيد اللغتين الإنكليزية والصينية، ويدرس مشكلة صعبة في النسبية العامة، فإن ما سيواجهه من تحديات سيكون على قدم المساواة من دون النظر لأية لغة استخدمها. فالتحول من الإنجليزية إلى الصينية أو العكس لن يقدم أفكاراً فيزيائية جديدة.

أما الأمثلة غير العادية على الثنائية فهي تلك التي فيها تؤدي الأوصاف المتمايزة لنفس الموقف الفيزيائي إلى وجهات نظر فيزيائية وطرق تحليل رياضية مختلفة ومكملة بعضها لبعض. وفي الواقع فإننا قد تعرضنا لمثالين على الثنائية. فقد ناقشنا في الفصل 10 كيف وصفت نظرية الأوتار عالماً له بعد دائري بنصف قطر R بنفس الطريقة التي وصفت بها عالماً له نصف قطر $\frac{1}{R}$. وهما وضعان هندسيان متمايزان، لكنهما من خلال خواص نظرية الأوتار، في الواقع، متطابقان فيزيائياً. والمثال الثاني هو تناظر صور المرآة. وهنا فإن شكلين مختلفين من أشكال كالابي-ياو لهما ستة أبعاد فضائية إضافية - وهي الأكوان التي تبدو لأول وهلة وكأنها متباينة تماماً - يؤديان بالضبط إلى نفس الخواص الفيزيائية. وهما بذلك يعطيان أوصافاً ثنائية لنفس الكون. ومن الأمور ذات الأهمية القصوى، وعلى عكس حالة اللغة الإنجليزية في مواجهة الصينية، أن هناك وجهات نظر فيزيائية تنتج من استخدام هذه الأوصاف الثنائية، مثل الحد الأدنى للأبعاد الدائرية والعمليات متغيرة الطوبولوجيا في نظرية الأوتار.

وفي مؤتمر الأوتار 1995، قدم ويتن في محاضرته دليلاً على نوع مدوٍّ جديد من الثنائية. وكما أشرنا باختصار في بداية هذا الفصل، اقترح ويتين أن النظريات الخمس للأوتار هي مجرد طرق مختلفة لوصف نفس الأساس الفيزيائي، على الرغم من أنها تبدو مختلفة في بنيتها الأساسية. وبدلاً من وجود خمس نظريات مختلفة للأوتار، فإن التعبير الأفضل هو أن هناك خمس نوافذ لهذا الإطار النظري المفرد.

وقبل التطورات التي وقعت في منتصف تسعينيات القرن العشرين، كان احتمال وجود مثل هذه الصورة العظيمة للثنائية مجرد حلم وردي يراود الفيزيائيين، الذين كان من النادر أن يتناولوه في حديثهم لأنه بدا لهم وكأنه شيء خرافي. فإذا اختلفت نظريتان من نظريات الأوتار في التفاصيل الواضحة لبنيتيهما، فإنه من الصعب أن نتخيل أنهما قد تكونان مجرد اختلاف في وصف نفس الأمر الأساسي في الفيزياء. إلا أنه ومن خلال القدرة الدقيقة لنظرية الأوتار، هناك أدلة متزايدة على أن كل النظريات الخمس للأوتار ثنائيات. والأكثر من ذلك، كما سنناقش في ما بعد فقد أعطى ويتن دليلاً على أن نظرية أوتار سادسة ستدخل ضمن الخليط.

وتدخل هذه التطورات بشكل حميم في نسيج الموضوعات المتعلقة بإمكانية تطبيق طرق الاضطراب التي تعاملنا معها في نهاية المقطع السابق. والسبب هو أن النظريات الخمس للأوتار تختلف بجلاء إذا كانت كل منها "ازدواجاً ضعيفاً" -

وهو اصطلاح يعني هنا أن ثابت ازدواج الوتر في النظرية أقل من 1. ولأن الفيزيائيين يعتمدون على طرق الاضطراب، فإنهم لم يتمكنوا لبعض الوقت من مواجهة السؤال حول خواص أية نظرية من نظريات الأوتار الخمس لو كان ثابت الازدواج الخاص بها أكبر من 1 - وهو السلوك المعروف باسم "الازدواج القوي". وما يزعمه ويتن وآخرون، كما نناقش ذلك الآن، أن هذا السؤال المحوري يمكن الإجابة عنه الآن. وقد أدت أبحاثهم إلى اقتراح، أنه مع إضافة نظرية سادسة لم نتطرق إليها بعد، فإن المسلك الازدواجي القوي لأية واحدة من هذه النظريات له وصف ثنائي بمدلول مسلك الازدواج الضعيف لنظرية أخرى والعكس صحيح.

ولتكتسب إحساساً أكثر وضوحاً بما يعنيه ذلك، فإن عليك أن تأخذ في اعتبارك التشبيه التالي. تخيل أن هناك شخصين معزولين، يعشق أحدهما الثلج لكنه للغرابة لم ير الماء في صورته السائلة. والآخر يحب الماء، لكنه ولنفس الغرابة لم ير الثلج. وفي مقابلة تمت بينهما بالصدفة قررا أن يقوما بالتخييم في رحلة صحراوية. وعندما قررا بدء الرحلة كان كل منهما معجباً بخبرة الآخر. فالشخص المحب للثلج كان مأخوذاً بالملمس الناعم كالحرير وشفافية السائل الذي يحبه الآخر، بينما كان الشخص المحب للماء السائل مأخوذاً بشدة بمكعبات البلورات الجامدة التي أحضرها محب الثلج. ولم يكن أي منهما على دراية بأن هناك ارتباطاً عميقاً فعلاً بين الماء السائل والثلج، فبالنسبة لهما، كانا مادتين مختلفتين تماماً. ولما بدآ رحلتهما في هجير الصحراء، أصابتهما صدمة عندما بدأ الثلج يتحول ببطء إلى ماء سائل. وفي صقيع ليالي الصحراء أصابتهما صدمة مماثلة عندما وجدا أن الماء السائل يتحول ببطء إلى ثلج جامد. وعندئذ أيقنا أنهما مادتان - وكانا يعتقدان في الأساس أن لا علاقة بينهما بالمرة - مرتبطتان بشكل حميم.

والثنائية الموجودة بين النظريات الخمس للأوتار واحدة بشكل ما: يلعب ثابت ازدواج الوتر دوراً مشابهاً لدرجة الحرارة في التشبيه المتعلق بالصحراء. ولأول وهلة فإن أي نظريتين من النظريات الخمس للأوتار سيكونان مثل الماء السائل والثلج، تبدوان وكأنهما مختلفتان تماماً. لكن إذا قمنا بتغيير ثابت الازدواج في كل منهما فإن النظريتين تتبادلان الأوضاع. وتماماً كما يتحول الثلج إلى ماء سائل عند رفع درجة الحرارة فإن إحدى نظريات الأوتار تتحول إلى أخرى إذا زادت قيمة ثابت الازدواج الخاص بها. ويأخذنا ذلك بعيداً في اتجاه تأكيد أن كل نظريات الأوتار هي أوصاف ثنائية لبنية أساسية واحدة - الأمر المشابه لـ H_2O

المعبر عن الماء والثلج.

ويعتمد المنطق الكامن وراء هذه النتائج كلية على استخدام الأدلة الموجودة في صلب مبدأ التناظر تقريباً. ولنناقش ذلك.

ثامناً: مقدرة التناظر

لم يحاول أحد على مر السنين أن يدرس خواص أية نظرية من نظريات الأوتار في حالة القيم الكبيرة لثابت ازدواج الوتر حيث أنه لم يكن أحد على دراية بكيفية القيام بذلك من دون الاستعانة بالإطار الاضطرابي. ومع ذلك فقد حقق الفيزيائيون تقدماً بطيئاً لكن ثابتاً في أواخر الثمانينيات وأوائل التسعينيات من القرن الماضي، وذلك في تحديد بعض الخواص المعينة - بما في ذلك كتل وشحنات قوى معينة - التي هي جزء من فيزياء الازدواج القوي لنظرية معينة من نظريات الأوتار، التي ما زال في مقدرونا حسابها. وقد لعبت حسابات هذه الخواص، والتي تخطت بالضرورة إطار الاضطراب، دوراً هاماً في دفع التقدم نحو الثورة الثانية للأوتار الفائقة، وهي متأصلة بشدة في مقدرة التناظر.

تقدم مبادئ التناظر أدوات نافذة لفهم أشياء كثيرة جداً عن العالم الفيزيائي. وقد ناقشنا على سبيل المثال الاعتقاد المدعم جيداً في أن قوانين الفيزياء لا تتعامل مع مكان ما في العالم، ومع لحظة ما من الزمان بخصوصية معينة، لكنها تسمح لنا بأن نؤكد أن القوانين التي تحكم مكاننا ولحظتنا هي نفس القوانين الصالحة لأي مكان وأي زمان. وهذا مثال رائع، غير أن مبادئ التناظر يمكن أن تكون بنفس الأهمية في ظروف أخرى ليست بهذه الروعة. فمثلاً إذا شهدت جريمة ولم تستطع أن ترى من المجرم سوى لمحة من جانب وجهه الأيمن، فإن فنان الشرطة يمكنه مع ذلك أن يرسم كل الوجه، مستغلاً المعلومات التي أدليت بها. وهذا هو التناظر. وعلى الرغم من وجود اختلافات بين الجانب الأيمن والجانب الأيسر لوجه أي شخص، إلا أن أغلبها متناظر بدرجة كافية بحيث يمكن عكس صورة الجانب الأيمن لتعطي صورة تقريبية جيدة للجانب الآخر.

وفي كل هذه التطبيقات شديدة الاختلاف تظهر قوة التناظر في مقدرته على تحديد الخواص بالضبط بطريقة غير مباشرة - وهو الأمر الذي غالباً ما يكون أسهل من الطريقة المباشرة. فيمكننا أن نعرف الفيزياء الأساسية لمجرة أندروميدا بالذهاب إليها وإيجاد كوكب حول أحد النجوم ثم بناء المعجلات وإجراء أنواع التجارب التي نقوم بها على الأرض. لكن الطريقة غير المباشرة التي تعتمد على التناظر تحت ظروف تغير المواقع أسهل بكثير. ويمكننا كذلك أن نعرف سمات

الجانب الأيسر من وجه مرتكب الجريمة بتعقبه والإمساك به ثم فحص وجهه، لكن غالباً ما يكون اللجوء لتناظر يمين-يسار للوجه شيئاً أيسر كثيراً[7].

والتناظر الفائق مبدأ أكثر تجريداً للتناظر، وهو يفسر الخواص الفيزيائية للمكونات الأولية التي تحمل كميات مختلفة من الحركة المغزلية. وفي أحسن الحالات ليس هناك سوى بعض الإيماءات من نتائج التجارب عن أن العالم الميكروي يتضمن هذا التناظر، لكن، ولأسباب سبق شرحها، هناك اعتقاد راسخ بأن هذا صحيح. ويمثل ذلك جزءاً متكاملاً من نظرية الأوتار بكل تأكيد. أيقن الفيزيائيون خلال تسعينيات القرن العشرين أن التناظر الفائق يقدم أداة قوية وحادة تستطيع الإجابة عن بعض الأسئلة الصعبة والهامة بطرق غير مباشرة، مسترشدين في ذلك بالأبحاث الرائدة لناثان سيبرغ من معهد الدراسات المتقدمة.

وبدون إدراك للتفاصيل المعقدة للنظرية، فكونها تحتوي على تناظر فائق يسمح لنا أن نضع قيوداً واضحة على الخواص الخاصة بها. وباستخدام التشابه اللغوي، تصور أنك أعطيت مظروفاً مغلقاً به ورقة مكتوب عليها سلسلة من الحروف بحيث يتكرر الحرف "Y" ثلاث مرات. فإذا لم يكن هناك أية معلومات أخرى فلا توجد أية طريقة يمكن بها تخمين التسلسل - وكل ما يمكن معرفته هو ترتيب عشوائي للحروف يتكرر بها الحرف "Y" ثلاث مرات، مثل: mvcfojziyxidqfqzyycdi، أو أي ترتيب آخر من الاحتمالات اللانهائية. وتخيل أننا قد أُعطينا معلومتين أخريين: تكوِّن الحروف المخبأة كلمة إنكليزية وإن بها أقل عدد من الحروف يمكن أن يكوِّن الكلمة مع معرفتنا بالمعلومة الأولى عن تكرار الحرف "Y" ثلاث مرات. وتختزل هذه المعلومات الاحتمالات إلى كلمة واحدة بدلاً من العدد اللانهائي لتسلسل الحروف عند البداية - وأقصر كلمة إنكليزية تحتوي على الحرف "Y" ثلاث مرات هي: syzygy.

ويزودنا التناظر الفائق بحلول مفسرة مماثلة لهذه النظريات التي تتضمن مبادئ التناظر الخاصة بها. وحتى ندرك ذلك تصور أنك حصلت على أحجية فيزيائية مشابهة للأحجية اللغوية التي شرحناها حالاً. هناك شيء ما مخبأ في صندوق - غير محدد الكنه - له شحنة قوة معينة. قد تكون هذه الشحنة كهربية أو مغناطيسية أو أياً من التعميمات الأخرى، لكن وحتى نكون محددين فإن لهذا الشيء ثلاث

(7) من الطبيعي ألا يوجد أي شيء على الإطلاق يؤكد صحة هذه المنطلقات غير المباشرة. فمثلاً، كما ان بعض الوجوه ليست متناظرة في جانبيها الأيمن والأيسر، "فمن المحتمل" أن تختلف قوانين الفيزياء في مناطق شاسعة البعد من الكون، كما سنوضح في الفصل 14.

وحدات من الشحنة الكهربية. ولا يمكن تحديد كنه محتوى الصندوق بدون معلومات أخرى. فقد يكون ثلاث جسيمات شحنة كل منها 1، مثل البوزيترونات والبروتونات، وقد تكون أربع جسيمات شحنتها 1 وجسيمة لها شحنة $\frac{1}{3}$ (مثل الإلكترون)، حيث أن المحصلة ستكون شحنة مقدارها ثلاثة؛ وقد تكونت تسعة جسيمات لكل منها شحنة مقدارها (مثل الكوارك الأعلى)، وقد تكون نفس الجسيمات التسع مصحوبة بأي عدد من الجسيمات عديمة الشحنة (مثل الفوتونات). والحال هنا مثل تسلسل الحروف عندما لم تكن هناك معلومة سوى وجود ثلاثة حروف "Y"، وبالتالي فإن احتمالات محتوى الصندوق ستكون لانهائية.

ولنتخيل الآن كما فعلنا في الأحجية اللغوية أننا قد زودنا بمعلومتين إضافيتين: النظرية التي تصف العالم - وبالتالي محتوى الصندوق - ذات تناظر فائق، وأن محتوى الصندوق له كتلة دنيا تتوافق مع المعلومة الأولى التي تتعلق بوجود ثلاث وحدات من الشحنة. وقد بين الفيزيائيون أن خصائص هذا الإطار التنظيمي المحكم (إطار التناظر الفائق، المماثل للغة الإنكليزية) و"التقييد الأدنى" (كتلة دنيا لكمية مختارة من الشحنة الكهربية المشابهة لأقل طول لكلمة تضم عدداً مختاراً من الحرف "Y") يعني أن كنه المحتوى المخبأ قد تم تحديده تماماً، وذلك بالاعتماد على أفكار بوغومولني ومانوج براساد وتشارلز سومرفيلد، وقد بيّن الفيزيائيون أن كنه محتويات الصندوق يمكن التعرف عليها تماماً بمجرد التأكيد على أنها أخف ما يمكن ومع الاحتفاظ بشحنتها المحددة. وتعرف مكونات الكتلة الدنيا لقيمة مختارة من الشحنة باسم حالة BPS، على شرف الأحرف الأولى لأسماء المكتشفين الثلاثة[8].

وأهم شيء يتعلق بحالات BPS هو أن خواصها تتحدد بالضبط بتفرد وسهولة من دون الرجوع إلى حسابات اضطرابية. وهذا أمر صحيح بغض النظر عن قيم ثابت الازدواج. أي أنه حتى لو كان ثابت ازدواج الوتر كبيراً، مما يعني أن منطلق الاضطراب لا يصلح للتطبيق، فإننا ما زلنا قادرين على استنتاج الخواص المضبوطة لتكوينات حالات BPS. ويطلق على هذه الخواص غالباً "الكتل والشحنات اللااضطرابية"، حيث أن قيمها تتجاوز مخطط التقريب الاضطرابي. ولهذا السبب يمكنك أن تعتقد أن BPS تشير إلى "ما بعد حالات الاضطراب".

وتتناول خواص BPS جزءاً صغيراً فقط من الفيزياء الكلية لنظرية الأوتار

(8) يعرف القارئ الخبير أن هذه المقولات تتطلب ما يسمى N=2 تناظر فائق.

المعنية عندما يكون ثابت الازدواج لتلك النظرية كبيراً، لكنها مع ذلك تقدم إدراكاً محسوساً لبعض خواص الازدواج القوي. وعندما يزيد ثابت الازدواج في إحدى نظريات الأوتار متخطياً المدى المتاح لتطبيق نظرية الاضطراب فإننا نلقي بفهمنا المحدود في حالات BPS. وكمعرفتنا بكلمات قليلة من لغة أجنبية، سنجد أنها تسهل الأمور علينا أكثر مما نتخيل.

تاسعاً: الثنائية في نظرية الأوتار

بتتبع خطوات ويتن لنبدأ بإحدى نظريات الأوتار الخمس، ولتكن نوع الأوتار I، ونتخيل أن كل الأبعاد الفضائية التسعة مسطحة وغير ملفوفة. وهذا أمر غير واقعي بالطبع، لكنه يجعل النقاش أبسط؛ وسنعود حالاً إلى الأبعاد المتجعدة. ولنبدأ بافتراض أن ثابت ازدواج الوتر أقل كثيراً من 1. وفي هذه الحالة فإن أدوات الاضطراب صالحة، وبالتالي فإن العديد من تفاصيل خواص النظرية يمكن التوصل إليها بدقة، وقد تم ذلك بالفعل. فإذا زدنا من قيمة ثابت الازدواج لكنه ما زال أقل من 1 بشكل معقول، فإن الطرق الاضطرابية ستظل صالحة، لكن الخواص التفصيلية للنظرية ستتغير بعض الشيء - فمثلاً تتغير القيم العددية المصاحبة لتشتت وتر مبتعد عن الآخر بعض الشيء لأن العمليات التي تجري للحلقات المتعددة في الشكل رقم (12–6) تسهم بشكل أكبر عندما يزداد ثابت الازدواج. وفي ما عدا هذه التغييرات في تفاصيل الخواص العددية فإن المحتوى الفيزيائي الكلي يظل هو نفسه ما دام ثابت الازدواج يقع في حدود تطبيق الاضطراب.

فإذا زدنا من قيمة ثابت ازدواج الوتر من النوع I ليتخطى قيمة 1، ستصبح الطرق الاضطرابية غير صالحة، وبذا فإننا سنركز فقط على المجموعة المحددة من الكتل والشحنات اللا اضطرابية - حالات BPS - التي ما زال في مقدورنا إدراكها. وسنذكر هنا ما قاله ويتين وتأكد بعد ذلك من خلال بحوث مشتركة مع جو بولتشينسكي من جامعة كاليفورنيا - سانت باربارا: تتفق هذه الخواص الازدواجية القوية لنظرية الأوتار من النوع I تماماً مع الخواص المعروفة لنظرية الأوتار هيتيروتيك-O عندما يكون للأخيرة قيمة صغيرة لثابت ازدواج الوتر الخاص بها. أي أنه عندما يكون ثابت الازدواج لأوتار النوع I كبيراً، فإن الكتل والشحنات المعنية والتي نعرف كيف نستخلصها تساوي بالضبط تلك الخاصة بأوتار هيتيروتيك-O عندما يكون ثابت ازدواجه صغيرة. ويعطي ذلك إشارة قوية على أن هاتين النظريتين واللتان، لأول وهلة مثل الماء السائل والثلج - تبدوان

مختلفتين تماماً، هما في الواقع ثنائي. ويقترح ذلك - بقوة - أن فيزياء النظرية من النوع I في حالة قيم ثابت الازدواج الخاص بها مماثلة تماماً لفيزياء نظرية هيتيروتيك-O عندما تكون قيم ثابت ازدواجها صغيرةً. وتقدم المجادلات المشابهة أدلة مقنعة بنفس الدرجة على أن العكس صحيح: فيزياء النظرية من النوع I في حالة القيم الصغيرة لثابت ازدواجها مماثلة لفيزياء نظرية هيتيروتيك-O عندما يكون ثابت ازدواجها كبيراً[9]. ومع أن النظريتين تبدوان وكأنهما غير مرتبطتين عند تحليلهما باستخدام منطلق التقريب الاضطرابي، فإننا نرى الآن أن كل واحدة منهما تتحول إلى الأخرى - الأمر الذي يشبه بعض الشيء التحول بين الماء السائل والثلج - عندما تتغير قيمة ثابت ازدواجهما.

ويعرف هذا النوع الجديد من النتائج المحورية والذي فيه فيزياء الازدواج القوي لإحدى النظريات يمكن التعبير عنه بفيزياء الازدواج الضعيف لنظرية أخرى باسم "ثنائية قوي-ضعيف" (Strong-Weak Duality). وكما في الثنائيات الأخرى التي ناقشناها سابقاً، فإن ذلك يدلنا على أن النظريتين المعنيتين ليستا في الواقع متمايزتين. وبالأحرى، فإنهما تقدمان توصيفاً مختلفاً لنفس أساس النظرية. وعلى عكس ثنائية اللغتين الإنكليزية - الصينية العادية، فإن "ثنائية قوي - ضعيف" ذات مقدرة عظيمة. وعندما يكون ثابت الازدواج لأحد أعضاء ثنائي النظرية صغيراً فإننا نستطيع تحديد خواصها الفيزيائية مستخدمين الأدوات الاضطرابية المتطورة. أما إذا كان ثابت الازدواج للنظرية كبيراً، وبالتالي لا تنجح الطرق الاضطرابية، فإننا يمكن أن نستخدم التوصيف الثنائي - التوصيف الذي يكون فيه ثابت الازدواج المقابل صغيراً - ونعود لتطبيق أدوات الاضطراب. وقد نتج من هذا التحول أن حصلنا على طرق كمية لتحليل نظرية كنا نعتقد في البداية أنها خارج حدود إمكانياتنا النظرية.

وفي الواقع فإن البرهنة على أن فيزياء الازدواج القوي لنظرية الأوتار من النوع I تناظر فيزياء الازدواج الضعيف لنظرية هيتيروتيك-O، والعكس، عملٌ في غاية الصعوبة لم يتوصل إليه أحد بعد. والسبب في ذلك بسيط. فأحد أعضاء زوج ثنائي النظريات المفترض لا يخضع للتحليلات الاضطرابية حيث أن ثابت الازدواج الخاص بها أكبر من اللازم. ويمنع ذلك الحسابات المباشرة للكثير من خواصها الفيزيائية. وفي الحقيقة، إنها هذه النقطة بالضبط التي تجعل الثنائية

(9) لو أردنا ان نكون أكثر دقة بعض الشيء، ورمزنا لثابت ازدواج هيتيروتيك-O بـ g_{HO}، ولثابت ازدواج النوع I بـ g_I، فإن العلاقة بين النظريتين تنص على أنهما متطابقتان فيزيائياً طالما كانت $g_{HO} = 1/g_I$، الأمر الذي يعني أن $g_I = 1/ g_{HO}$. فإذا كان أحد الثابتين كبيراً كان الآخر صغيراً.

المفترضة ذات مقدرة عالية، لأنه إذا كانت صحيحة فإنها تقدم أداة جديدة لتحليل النظرية ذات الازدواج القوي: تطبيق الطرق الاضطرابية على توصيف ثنائي الازدواج الضعيف.

وحتى إذا لم نستطع أن نبرهن على أن النظريتين تكوّنان ثنائياً، فإن التوازن التام بين خواصهما الذي يمكن استخلاصه بكل ثقة يقدم دلائل مقنعة للغاية على أن علاقة ترابط ازدواج قوي-ضعيف بين النظرية من النوع I ونظرية هيتيروتيك-O صحيحة. وفي الحقيقة جاءت كل الحسابات الذكية التي أجريت لاختبار الثنائية المقترحة بنتائج إيجابية. وقد اقتنع معظم منظري نظرية الأوتار بأن الثنائية أمر صحيح.

وباتباع نفس المنطق يمكن للمرء أن يدرس خواص الازدواج القوي لنظرية أوتار أخرى، ولتكن من نوع أوتار IIB. وكما ارتبط الأمر أصلاً بكل من هول وتاونسند، وأيدته أبحاث عدد من الفيزيائيين، اتضح أن هناك شيء ما بنفس الأهمية قد حدث. كلما زاد ثابت الازدواج لنوع أوتار IIB أكثر وأكثر فإن الخواص الفيزيائية التي ما زلنا قادرين على فهمها تبدو أنها تتوافق تماماً مع خواص الازدواج الضعيف للوتر من نوع IIB نفسه. وبمعنى آخر، فإن الوتر من نوع IIB يكون "ثنائياً ذاتياً" مع نفسه Self-Dual[10]. وبالتحديد فإن التحاليل التفصيلية تقترح بإغراء انه إذا كان ثابت ازدواج النوع IIB أكبر من 1، وإذا كان علينا أن نغير من قيمته إلى معكوسه (وبذلك ستصبح قيمته أقل من 1)، فإن النظرية الناتجة ستكون بالتأكيد مماثلة تماماً لتلك التي بدأنا بها. ويشبه الأمر هنا ما وجدناه عندما حاولنا اعتصار بعد دائري على طول أقل من طول بلانك، فإننا إذا حاولنا زيادة قيمة ازدواج النوع IIB إلى قيمة أكبر من 1، سيبين الثنائي الذاتي أن النظرية الناتجة مكافئة تماماً لنظرية النوع IIB ذات الازدواج الأقل من 1.

عاشراً: موجز ما تم حتى الآن

لنفحص الوضع الذي وصلنا إليه الآن. بحلول منتصف الثمانينيات من القرن العشرين كان الفيزيائيون قد توصلوا إلى خمس نظريات مختلفة للأوتار الفائقة. وتبدو هذه النظريات كلها مختلفة من منطلق التقريب في نظرية الاضطراب، غير

(10) وهذا الأمر قريب الشبه بثنائية R، 1/R التي ناقشناها مسبقاً. فإذا رمزنا لثابت ازدواج الوتر من النوع IIB بـ g_{IIB} فإن المقولة التي تبدو صحيحة وهي أن قيم g_{IIB}، $1/g_{IIB}$ تتعلق بنفس الفيزياء. فإذا كان g_{IIB} كبيراً، كان $1/g_{IIB}$ صغيراً، والعكس صحيح.

أن طريقة التقريب صالحة فقط إذا كان ثابت ازدواج الوتر في نظرية معينة أقل من 1. كانت التوقعات تنبئ بأن الفيزيائيين سيتمكنون من حساب القيمة الدقيقة لثابت ازدواج الوتر في أي نظرية للأوتار، غير أن صيغة معادلات التقريب المتاحة في ذلك الوقت جعلت هذا الأمر مستحيلاً. ولهذا السبب اتجه الفيزيائيون لدراسة كل نظرية من النظريات الخمس للأوتار في مدى من القيم المحتملة لثابت الازدواج الخاصة بكل منها، للأقل من 1 وللأكثر من 1 - أي للازدواج الضعيف والازدواج القوي. غير أن طرق الاضطراب التقليدية لا تقدم أفكاراً حول خصائص الازدواج القوي في أي من نظريات الأوتار.

وحديثاً، وباستخدام مقدرة التناظر الفائق، تعلم الفيزيائيون كيف يحسبون بعض خواص الازدواج القوي لنظرية معينة من نظريات الأوتار. ولدهشة أغلب العاملين في هذا المجال، تبدو خواص الازدواج القوي لنظرية الأوتار من نوع هيتيروتيك-O مطابقة لخواص الازدواج الضعيف للأوتار من النوع I، والعكس صحيح. والأكثر من ذلك، فإن فيزياء الازدواج القوي في أوتار النوع IIB تناظر خواصها نفسها عندما يكون الازدواج ضعيفاً. وقد شجعتنا هذه الروابط غير المتوقعة أن نتبع خطوات ويتن ونهتم بالنظريتين الأخريين للأوتار، من النوع IIA، والنوع هيتيروتيك-E، لنرى مدى توافقهما مع الصورة العامة. وسنجد هنا مفاجآت أكثر غرابة. وحتى نستعد لهذه المفاجآت فإننا في حاجة إلى استطراد تاريخي موجز.

حادي عشر: الجاذبية الفائقة

في نهاية السبعينيات وبداية الثمانينيات من القرن العشرين، وقبل موجة الاهتمام بنظرية الأوتار، بحث كثير من الفيزيائيين النظريين النظرية الموحدة لميكانيكا الكم والجاذبية والقوى الأخرى في إطار نظرية مجال الكم للجسيمة النقطة. وكان الأمل أن عدم التوافق بين نظريات الجسيمات النقاط المتضمنة للجاذبية وميكانيكا الكم يمكن التغلب عليه وذلك بدراسة نظريات بها مزيد من التناظر. وفي العام 1976، اكتشف كل من دانيال فريدمان وسيرجيو فيرارا وبيتر فان نيووينهيوزين، وكانوا جميعاً وقتها في ولاية نيويورك في ستوني بروك، أن أكثر النظريات هي تلك المتضمنة للتناظر الفائق. حيث أن ميل البوزونات والفيرميونات لإعطاء تأرجحات كمية للتلاشي يساعد في تهدئة الجيشان المجهري العنيف. وقد صك هؤلاء المؤلفون مصطلح "الجاذبية الفائقة" لوصف نظريات المجال الكمي فائقة التناظر التي تحاول أن تتضمن النسبية العامة. وقد باءت مثل هذه المحاولات

لمزج النسبية العامة مع ميكانيكا الكم في النهاية بالفشل. إلا أنه، وكما ذكرنا في الفصل 8، كان هناك درس نتعلمه للمستقبل من هذه الدراسات، الدرس الذي بشر بتطور نظرية الأوتار.

كان الدرس الذي ربما صار الأكثر جلاءً من خلال أبحاث كل من يوجين كريمر وبرنارد جوليا وشيرك، وجميعهم من دار المعلمين العليا (Ecole Normale Supérieure)، هو أن أقرب المحاولات إلى النجاح كانت نظريات الجاذبية الفائقة التي صيغت لأكثر من أربعة أبعاد. وبالذات كانت الواعدة منها أكثر من غيرها تلك التي بها عشرة أو حتى أحد عشر بعداً. وقد اتضح أن تلك ذات الأحد عشر بعداً هي الأكثر احتمالاً[11]. كان الاتصال بأربعة أبعاد قد استكمل في إطار كالوزا وكلاين مرة أخرى: كانت الأبعاد الإضافية متجعدة. وفي نظريات الأبعاد العشرة، كما في نظرية الأوتار، كانت ستة من هذه الأبعاد متجعدة بينما في حالة نظرية الأحد عشر بعداً كانت هناك سبعة متجعدة.

وعندما عصفت نظرية الأوتار بالفيزيائيين سنة 1984، تغيرت النظرة إلى نظريات الجاذبية الفائقة للجسيمة النقطة رأساً على عقب. وكما أكدنا مراراً، إذا اختبرنا أحد الأوتار بالدقة المتاحة حالياً والمتاحة في القريب العاجل، سيبدو كأنه جسيمة نقطة. ويمكن صياغة هذه الملاحظة غير الرسمية بدقة كالآتي: عند دراسة العمليات منخفضة الطاقة في نظرية الأوتار - تلك العمليات التي لا تملك ما يكفي من الطاقة ليمكِّنها من اختبار الطبيعة فوق المجهرية الممتدة للأوتار - يمكننا تقريب الوتر ليصبح جسيمة نقطة بلا بنية مستخدمين إطار نظرية مجال الكم للجسيمة النقطة. ولا نستطيع استخدام هذا التقريب عندما نتعامل مع عمليات المسافات القصيرة أو تلك ذات الطاقة العالية لأننا نعرف أن الطبيعة الممتدة للوتر أمر حتمي لمقدرته على حل التناقض بين النسبية العامة وميكانيكا الكم الذي لا تقدر عليه نظرية الجسيمة النقطة. لكن عندما تكون الطاقة منخفضة بما فيه الكفاية - أي في المسافة الكبيرة بدرجة كافية - لن نصادف هذه المشكلات، ويُجرَى مثل هذا التقريب غالباً لغرض تسهيل الحسابات.

ونظرية مجال الكم التي تقرب أفضل ما يمكن نظرية الأوتار على هذا المنوال ليست إلا الجاذبية الفائقة ذات الأبعاد العشرة. وقد أدركنا الآن أن الخواص المميزة للجاذبية الفائقة ذات الأبعاد العشرة والتي اكتشفت في سبعينيات

---

(11) إذا كانت كل الأبعاد متجعدة ما عدا أربعة، فإن نظرية فيها أكثر من أحد عشر بعداً لا بد أن تعطي جسيمات لا كتلة لها ذات حركة مغزلية أكبر من 2، الأمر المستحيل عملياً ونظرياً.

وثمانينيات القرن العشرين ما هي إلا بقايا طاقة منخفضة للمقدرة الكامنة في أساس نظرية الأوتار. ولم يكتشف الباحثون الدارسون للجاذبية الفائقة ذات الأبعاد العشرة إلا قمة جبل جليد هائل - وهو البنية الثرية لنظرية الأوتار الفائقة. وقد اتضح في الواقع أن هناك أربع نظريات مختلفة للجاذبية الفائقة ذات الأبعاد العشرة، التي تختلف في تفاصيل الطريقة الدقيقة التي تتضمن التناظر الفائق. واتضح أن ثلاثاً من هذه النظريات الأربع هي تقريب للجسيمات النقاط ذات الطاقة المنخفضة إلى أوتار من الأنواع IIA وIIB وهيتيروتيك-E. أما النظرية الرابعة فتقدم التقريب للجسيمات النقاط ذات الطاقة المنخفضة لكل من أوتار النوع I وهيتيروتيك-O، وفي هذا الصدد، كانت تلك أول إشارة إلى الارتباط القوي بين هاتين النظريتين للأوتار.

وهذه قصة عظيمة، إلا أنها وضعت الجاذبية الفائقة ذات الأبعاد الأحد عشر في موقف صعب. وليس فى صياغة نظرية الأوتار ذات الأبعاد العشرة مكان لنظرية الأبعاد الأحد عشر. ولعدة سنوات كان الرأي العام لمعظم منظري نظرية الأوتار - وليس جميعهم - أن الجاذبية الفائقة ذات الأبعاد الأحد عشر شذوذ رياضي لا علاقة له البتة بفيزياء نظرية الأوتار(12).

ثاني عشر: بصيص من نظرية -M

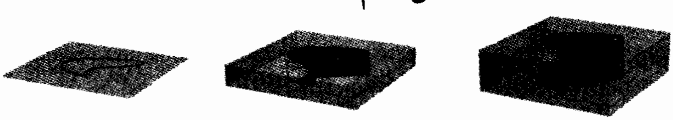
اختلف الوضع الآن. وفي مؤتمر الأوتار لعام 1992 دفع ويتن بأنه إذا بدأنا بأوتار من النوع IIA، ورفعنا ثابت ازدواجها من قيمة أقل كثيراً من 1 إلى قيمة أكبر كثيراً من 1، فإن الفيزياء التي سنقدر على تحليلها (في الأساس تلك التي تختص بالبنى المشبعة لـ BPS) لها تقريب ذو طاقة منخفضة، أي أنها جاذبية فائقة ذات أحد عشر بعداً.

أصاب إعلان ويتن لهذا الاكتشاف المؤتمرين بالذهول، واهتز بعنف مجتمع فيزياء الأوتار منذ هذه اللحظة. لقد كان تطوراً لم يتوقعه أحد بالمرة في هذا المجال. قد يكون أول رد فعلك صدى لما قاله معظم الخبراء في هذا المجال: "كيف يمكن لنظرية معينة ذات أحد عشر بعداً أن تتواءم مع نظرية مختلفة ذات عشرة أبعاد؟" .

(12) والاستثناء الجدير بالملاحظة هو الأبحاث الهامة في العام 1987 التي قام بها كل من داف، وبول هو، وتاكيو إينامي، وكيلي ستيل، حيث واصلوا أفكار إيريك بيرغشوف، وإيرجين سيرجين، وتاونسند، ليؤكدوا أن نظرية للأوتار ذات عشرة أبعاد لا بد من أن تضم بعداً حادي عشر دفيناً.

والجواب ذو مغزى عميق. وحتى نفهمه لابد من أن نشرح نتائج ويتن بدقة أكثر. وفي الواقع من الأسهل أولاً أن نصور النتيجة المتعلقة بذلك والتي اكتشفت في ما بعد بواسطة ويتن وبيتر هورافا - باحث منحة ما بعد الدكتوراه بجامعة برينستون - التي ركزت على أوتار هيتيروتيك-E. وجد الباحثان أن أوتار هيتيروتيك-E قوية الازدواج لها أيضاً صفة الأبعاد الأحد عشر، ويبين الشكل رقم (12-7) لماذا يحدث ذلك. وفي أقصى يسار الشكل افترضنا أن ثابت ازدواج وتر هيتيروتيك-E أقل كثيراً من 1. إنه العالم الذي دأبنا على وصفه في الفصول السابقة وظل منظرو نظرية الأوتار يدرسونه لأكثر من عقد من الزمان. وكلما تحركنا ناحية اليمين في الشكل رقم (12-7) نرفع بالتتابع من قيمة ثابت الازدواج. وقبل العام 1995 كان منظرو نظرية الأوتار يعرفون أن ذلك سيجعل عملية الحلقات ذات أهمية متزايدة[13]، وكلما زاد ثابت الازدواج سيزيد ذلك من عدم صلاحية الإطار الاضطرابي. غير أن الذي لم يتوقعه أحد هو أنه عند زيادة قيمة ثابت الازدواج سيظهر بُعْد جديد! وهذا هو البعد "الرأسي" الموضح في الشكل رقم (12-7). ولنأخذ في اعتبارنا أنه في هذا الشكل تمثل الشبكة ذات البعدين التي بدأنا بها كل الأبعاد التسعة الفضائية لأوتار هيتيروتيك-E. وهكذا فإن البعد الرأسي الجديد يمثل بعداً فضائياً عاشراً، الذي مع بعد الزمن يجعل من مجموع الأبعاد أحد عشر بعداً زمكانياً.

الشكل رقم (12-7)



عندما يزيد ثابت ازدواج وتر هيتيروتيك-E ينشأ بعد فضائي جديد، ويتمدد الوتر نفسه إلى شكل غشاء أسطواني.

وأكثر من ذلك، يوضح الشكل رقم (12-7) نتيجة عميقة لهذا البعد الجديد. وتتغير "بنية" الوتر هيتيروتيك-E كلما نما هذا البعد. ويتمدد من حلقة ذات بعد واحد إلى شريط ثم يتحول إلى اسطوانة مشوهة بزيادة قيمة ثابت الازدواج! وبمعنى آخر فإن الوتر هيتيروتيك-E هو "في الواقع غشاء ذو بعدين" يتوقف عرضه (الامتداد الرأسي في الشكل رقم (12-7)) على قيمة ثابت الازدواج.

(13) انظر الشكل رقم (12-6).

ولأكثر من عقد، كان منظرو نظرية الأوتار يستخدمون بصورة دائمة الطرق الاضطرابية التي كانت متأصلة في افتراض أن ثابت الازدواج صغير جداً. وكما دفع ويتن، فإن هذا الافتراض قد جعل المكونات الأساسية تبدو وتسلك مسلك الأوتار ذات البعد الواحد مع أنها في الواقع تملك بعداً فضائياً ثانياً مختفياً. وبالتغاضي عن افتراض أن ثابت الازدواج صغير جداً، والأخذ في الاعتبار فيزياء أوتار هيتيروتيك-E، عندما كان ثابت الازدواج كبيراً، فإن البعد الثاني يصبح واضحاً.

ولا يبطل هذا التيقن أياً من الاستنتاجات التي توصلنا إليها في الفصول السابقة، لكنه يجبرنا على أن نراها في إطار جديد. فمثلاً، كيف يمكن لكل ذلك أن يتناسب مع بعد واحد زماني وتسعة أبعاد فضائية التي تتطلبها نظرية الأوتار؟ حسناً، لنسترجع من الفصل 8 أن هذا القيد ينتج من إحصاء عدد الاتجاهات المستقلة التي يمكن للوتر أن يتذبذب فيها، ويتطلب أن يكون هذا العدد مناسباً بالضبط ليؤكد أن الاحتمالات الكمية لها قيم معقولة. والبعد الجديد الذي اكتشفناه حالاً ليس أحد الأبعاد التي يمكن للوتر هيتيروتيك-E أن يتذبذب فيها، لأنه بعد محبوس داخل بنية "الأوتار" نفسها. ولنصغ الأمر بطريقة أخرى، حيث الإطار الاضطرابي الذي استخدمه الفيزيائيون للتوصل إلى أن المطلوب هو زمكان ذو عشرة أبعاد والمفترض منذ البداية أن يكون ثابت الازدواج لأوتار هيتيروتيك-E صغيراً. وقد دعمت المعلومة الضمنية التالية تقريبين يؤيد أحدهما الآخر على الرغم من عدم الاعتراف بذلك إلا بعد زمن طويل: اتساع الغشاء في الشكل رقم (12-7) صغير، الأمر الذي يجعله يبدو وكأنه وتر، وأن البعد الحادي عشر من الصغر بحيث يقع خارج نطاق حساسية معادلات الاضطراب. وفي سياق خطة التقريب هذه فإننا مجبرون على أن نتخيل عالماً ذا عشرة أبعاد ممتلئاً بأوتار ذات بعد واحد. ونرى الآن أن هذا ليس إلا تقريباً لعالم ذي أحد عشر بعداً محتوياً على أغشية ذات بعدين.

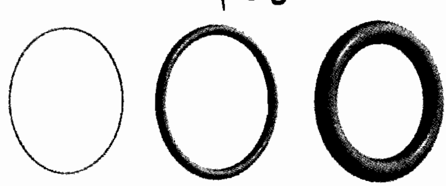
ولأسباب تقنية، وضع ويتن يده على البعد الحادي عشر أول مرة أثناء دراسته لخواص الازدواج القوي لأوتار النوع IIA، وتتشابه القصة بعد ذلك، وكما في حالة مثال هيتيروتيك-E هناك بعد حادي عشر قيمته محكومة بثابت ازدواج النوع IIA. وعند زيادة قيمته فإن البعد الجديد يأخذ في النمو. وقد دفع ويتن بأنه عندما يحدث ذلك، فإن هذا البعد بدلاً من أن يتمدد على شكل شريط كما في حالة هيتوريتيك-E، فإنه يمتد متحولاً إلى "أنبوبة داخلية" كما في الشكل رقم (12-8). ومرة أخرى دفع ويتين بأنه على الرغم من أن النظريين يرون دائماً أوتار

النوع IIA على أنها أجسام ذات بعد واحد لها طول فقط وليس لها سمك، فإن هذه النظرة انعكاس لمخطط تقريب اضطرابي، يفترض أن يكون فيه ثابت ازدواج الوتر صغيراً. فإذا كانت الطبيعة تتطلب قيمة صغيرة لثابت الازدواج هذا، فإن ذلك تقريب جدير بالثقة. ومع ذلك، فإن أبحاث ويتن وفيزيائيين آخرين أثناء الثورة الثانية للأوتار الفائقة تقدم دليلاً قوياً على أن "أوتار" النوع IIA والنوع هيتيروتيك-E هي في الأساس أغشية ذات بعدين تعيش في عالم له أحد عشر بعداً.

ولكن ماذا عن هذه النظرية ذات الأحد عشر بعداً؟ بيّن ويتن وآخرون أنه في ظروف الطاقات المنخفضة (منخفضة مقارنة بطاقة بلانك) فإن هذه النظرية قد تم تقريبها بإهمال البعد الحادي عشر لنظرية مجال الكم للجاذبية الفائقة. لكن كيف نصف هذه النظرية في ظروف الطاقات العالية؟ ويتعرض هذا الموضوع لدراسة مستفيضة حالياً. ونحن نعرف من الشكلين رقمي (12-7) و(12-8) أن النظرية ذات الأبعاد الأحد عشر تتضمن أجساماً ممتدة ذات بعدين - أغشية ذات بعدين. وكما سنناقش حالاً، تلعب الأجسام الممتدة لأبعاد أخرى دوراً هاماً كذلك، ولكن في ما عدا مزيج الخواص، فلا أحد يعرف كنه نظرية الأحد عشر بعداً. فهل الأغشية هي مكوناتها الأساسية؟ وما هي خواصها المحددة؟ وكيف تزعم هذه النظرية أنها على صلة بالفيزياء التي نعرفها؟ فإذا كانت ثوابت الازدواج المعينة صغيرة فإن إجاباتنا الحالية عن هذه الأسئلة موجودة في الفصول السابقة، حيث أنه عند قيم صغيرة لثابت الازدواج فإننا نعود ثانية إلى نظرية الأوتار. أما إذا كان ثابت الازدواج ليس صغيراً فلا أحد يعرف الإجابة حالياً.

ومهما كانت نظرية الأبعاد الأحد عشر، فإن ويتن قد أطلق عليها مؤقتاً نظرية-M. وقد جاءت التسمية لتدل على أشياء كثيرة كما تشاء، وإليك بعض العينات: نظرية الغموض Mystery، والنظرية الأم Mother (مثل "أم كل النظريات")، ونظرية الغشاء Membrane (لأنه مهما كانت فإن الأغشية تمثل جزءاً

الشكل رقم (12-8)



بزيادة ثابت ازدواج أوتار النوع IIA تتمدد الأوتار من حلقات ذات بعد واحد إلى أجسام ذات بعدين تبدو كالإطار الداخلي لدراجة.

من الرواية)، نظرية المصفوفات Matrix (بناء على الأبحاث الحديثة بواسطة توم بانكس من جامعة روتجرز (Rugers)، وويلي فيشلر من جامعة تكساس في أوستن، وستيفن شينكر من جامعة روتجرز، وساسكيند، الذين قدموا تفسيراً جديداً للنظرية). غير أنه حتى بدون فهم كامل لمغزى الاسم أو الخواص، فإنه من الواضح بالفعل أن نظرية-M هي الأرضية الموحدة لربط كل نظريات الأوتار الخمس معاً.

ثالث عشر: نظرية-M وشبكة الترابطات

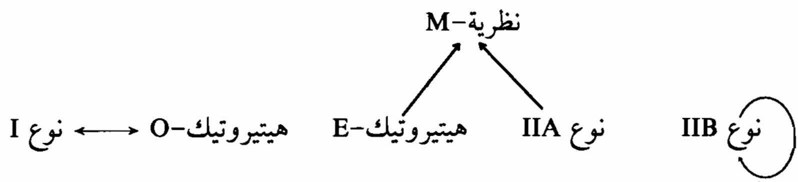
هناك مثل قديم عن ثلاثة عميان وفيل. أمسك الأول بناب العاج للفيل ووصف نعومته وصلابته التي يحسها. أما الثاني فقد أمسك بأحد أرجل الفيل وأخذ يصف المحيط الخشن ذا العضلات الذي يحسه. بينما أمسك الأعمى الثالث بذيل الفيل ووصف الزائدة القوية الرفيعة التي يحسها. وحيث أن وصف كل منهم يختلف عن وصف الآخرين، ولأنه لا يرى أي واحد منهم الآخرين، فإن كلاً منهم يظن أنه قد أمسك بحيوان مختلف. ولعدة سنوات كان الفيزيائيون في ظلام مثلهم في ذلك مثل العميان، يظنون أن نظريات الأوتار المختلفة مختلفة جداً بالفعل. أما الآن وبواسطة البصيرة النافذة لثورة الأوتار الفائقة الثانية، فإن الفيزيائيين قد أيقنوا أن نظرية-M هي الشأن الموحد لنظريات الأوتار الخمس.

ناقشنا في هذا الفصل التغيرات التي طرأت على مفهومنا لنظرية الأوتار التي ظهرت عندما غامرنا متخطين نطاق الإطار الاضطرابي - الإطار الذي كان يستخدم ضمنياً قبل هذا الفصل. ويوجز الشكل رقم (12-9) العلاقات المتبادلة التي اكتشفناها حتى الآن، مستخدمين الأسهم لبيان ثنائيات النظريات. وكما ترى، فإن لدينا شبكة من الترابطات إلا أنها ليست مكتملة بعد. وبتضمين الثنائيات من الفصل العاشر يكون العمل قد اكتمل.

ولنعد إلى ثنائية نصف القطر الدائري الكبير/الصغير، الذي تتبادل فيه أنصاف أقطار البعد الدائري R مع أنصاف أقطار $\frac{1}{R}$. كنا سابقاً نفسر إحدى سمات هذه الثنائية تفسيراً خاطئاً، وعلينا الآن أن نوضح ذلك. فلقد ناقشنا في الفصل 10 خواص الأوتار في عالم ذي أبعاد دائرية من دون أن نعنى بتحديد أية صياغة من صيغ نظريات الأوتار الخمسة هي التي نستخدمها. وقد ذكرنا أن التبادل في أنماط الدوران والذبذبة للأوتار يسمح لنا بإعادة صياغة الوصف النظري لوتر في عالم ذي بعد دائري نصف قطره $\frac{1}{R}$ بمدلول آخر نصف قطره R. كانت النقطة التي أخطأنا في تفسيرها هي أن نظريات أوتار النوع IIA

والنوع IIB تتبادل في الواقع بواسطة هذه الثنائية مثل ما يحدث بين أوتار هيتيروتيك-O وهيتيروتيك-E. أي أن المقولة الأكثر دقة لثنائية نصف القطر كبير/صغير هي: فيزياء أوتار النوع IIA، في عالم ذي بعد دائري نصف قطره R، مطابقة لفيزياء الأوتار من النوع IIB في عالم ذي بعد دائري نصف قطره $\frac{1}{R}$ (وتصدق نفس المقولة على أوتار هيتيروتيك-E وهيتيروتيك-O). وليس لهذا التنقيح لثنائية نصف القطر كبير/صغير تأثير محسوس على استنتاجات الفصل 10، لكن لها بالفعل بصمة هامة على مناقشتنا الحالية.

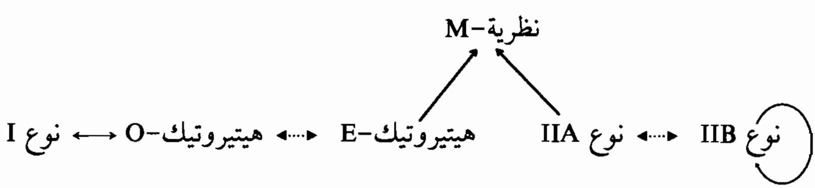
الشكل رقم (12-9)



تبين الأسهم أي النظريات ثنائية بالنسبة للأخريات.

وسبب ذلك أنه بوجود رابطة بين نظريات الأوتار من النوع IIA والنوع IIB، وكذلك بين نظريتي هيتيروتيك-O وهيتيروتيك-E، فإن ثنائية نصف القطر كبير/صغير تكمل شبكة الترابط كما هو موضح بالخطوط المنقطة في الشكل رقم (12-10). ويبين هذا الشكل أن كل نظريات الأوتار الخمس مع نظرية-M جميعها ثنائيات بعضها بعض، وقد حيكت جميعها في إطار نظري مفرد؛ وهي تقدم خمسة منطلقات مختلفة لوصف نفس الفيزياء الأساسية. ومن الممكن أن تكون إحدى الصياغات أكثر مواءمة من الأخرى في بعض التطبيقات. فعلى

الشكل رقم (12-10)



بتضمين الثنائيات المتضمنة الشكل الهندسي للزمكان (كما في الفصل 10)، فإن كل نظريات الأوتار الخمس ونظرية-M تتصل ببعضها في شبكة من الثنائيات.

سبيل المثال، فإنه أسهل كثيراً استخدام نظرية الازدواج الضعيف هيتيروتيك-O من استخدام نظرية الازدواج القوي من النوع I. ومع ذلك فالاثنتان تصفان نفس الفيزياء بالضبط.

ثالث عشر: الصورة الشاملة

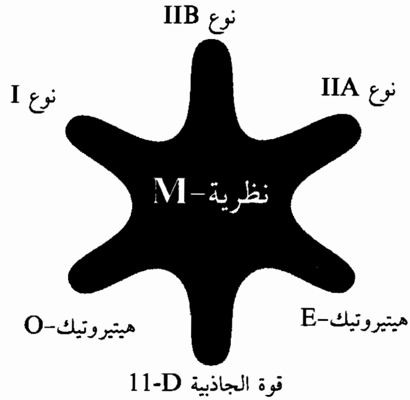
والآن يمكننا فهم الشكلين - رقمي (12-1) و(12-2) - فهماً تاماً، وهما الشكلان اللذان أوردناهما في أول هذا الفصل لعرض النقاط الأساسية. من الشكل رقم (12-1) نرى أنه قبل العام 1995 ومن دون احتساب للثنائيات، كان لدينا خمس نظريات للأوتار متباينة ظاهرياً. قام مختلف الفيزيائيين بالبحث في كل نظرية، ولكن من دون إدراك للثنائية، فبدت هذه النظريات مختلفة بعضها عن بعض. وكان لكل نظرية سمات متغيرة مثل قيمة ثابت الازدواج والشكل الهندسي وأطوال أبعاد التجعد. كان الأمل (وما زال) أن تتحدد هذه الخواص المميزة بواسطة النظرية نفسها، ولكن بدون المقدرة على تحديدها بمعادلات التقريب الحالية، فمن الطبيعي أن يقوم الفيزيائيون بدراسة الفيزياء التي تنتج من شتى الاحتمالات. وقد مثلنا هذا في الشكل رقم (12-1) بالمناطق المظللة - وتدل كل نقطة في مثل تلك المناطق على اختيار محدَّد لثابت الازدواج وهندسة التجعد. وبدون إقحام أية ثنائيات، فما زلنا نملك خمس نظريات منفصلة (مجموعة من النظريات).

غير أننا لو استخدمنا الآن كل الثنائيات التي ناقشناها، وبتغيير المؤشرات الازدواجية والهندسية، من الممكن أن نعبر من إحدى النظريات إلى الأخرى، طالما أننا نضمِّن المنطقة المركزية الموحدة في نظرية-M؛ الأمر المبين في الشكل رقم (12-2). ومع ذلك، حتى إذا لم يكن لدينا سوى فهم قاصر لنظرية-M، فإن هذه المجادلات غير المباشرة قدمت دعماً قوياً إلى الزعم القائل بأن النظرية تقدم أرضية موحدة لنظرياتنا الخمس للأوتار المتباينة بسذاجة. والأكثر من ذلك، فقد علمنا أن نظرية-M ترتبط بشدة بنظرية أخرى سادسة - الجاذبية الفائقة ذات الأبعاد الأحد عشر - وهو الأمر المبين في الشكل رقم (12-11)، وهي صورة أكثر دقة للشكل رقم (12-2)[14].

---

(14) وبشكل أكثر دقة، فإن هذا الشكل يجب أن يُفهم كما نقول إن لدينا نظرية واحدة تعتمد على عدد من المؤشرات. وتضم المؤشرات ثوابت الازدواج بجانب مؤشرات الحجم والشكل الهندسيين. ومن ناحية المبدأ، فإننا لا بد أن نكون قادرين على استخدام النظرية لحساب القيم المحددة لكل هذه المؤشرات - قيمة معينة لثابت الازدواج وشكل معين لهندسة الزمكان - غير أنه في إطار فهمنا النظري الحالي، =

الشكل رقم (12-11)



بتضمين الثنائية تندمج كل النظريات الخمس للأوتار والجاذبية الفائقة ذات الأبعاد الأحد عشر ونظرية-M كلها معاً في إطارٍ موحد.

يصور الشكل رقم (12-11) أن الأفكار الأساسية ومعادلات نظرية-M توحد كل صيغ نظريات الأوتار، على الرغم من فهمنا الجزئي لهذه النظرية حتى هذه اللحظة. ونظرية-M هنا بمثابة الفيل الذي فتح أعين منظري نظرية الأوتار على إطار أعظم كثيراً للتوحد.

رابع عشر: السمة المفاجئة لنظرية-M: ديمقراطية متوسعة

عندما يكون ثابت ازدواج الوتر صغيراً في أي من مناطق أشباه الجزر الخمس العلوية للخريطة النظرية في الشكل رقم (12-11)، فإن العناصر الأساسية للنظرية تبدو وكأنها وتر ذو بعد واحد. ومع ذلك فقد اكتسبنا حالاً منظوراً جديداً لهذه الملاحظة. فإذا بدأنا بأي من المناطق، هيتيروتيك-E أو النوع IIA، ورفعنا قيمة ثابت ازدواج الوتر المعني، فإننا ننتقل بذلك إلى منتصف الخريطة في الشكل رقم (12-11)، وإلى ما يبدو وكأنه تمدد أوتار ذات بعد واحد لتصبح غشاء ذا

= فإننا لا نعرف كيف نتوصل إلى ذلك. وهكذا، لفهم النظرية بشكل أفضل، درس منظرو نظرية الأوتار خواصها مثل تغيير قيم هذه المؤشرات لتغطي جميع الاحتمالات. فإذا كانت القيم المختارة للمؤشرات تقع في منطقة أي من أشباه الجزر الستة في الشكل رقم (12-11)، فسيكون للنظرية الخواص المتأصلة في إحدى نظريات الأوتار الخمس، أو تلك المتأصلة في الجاذبية الفائقة ذات الأحد عشر بعداً، كما هو موضح. أما إذا كانت القيم المختارة تقع في المنطقة الوسطى، فإن الفيزياء هنا ستكون محكومة بنظرية-M الغامضة.

بعدين. والأكثر من ذلك، ومن خلال تتابع علاقات الثنائية المعقدة إلى حد ما والمتضمنة كلاً من ثابت الازدواج والصورة التفصيلية للأبعاد المكانية المتجعدة، فإننا نستطيع الانتقال بسهولة وبصورة مستمرة من أية نقطة في الشكل رقم (12-11) إلى أية نقطة أخرى. وحيث أن الأغشية ذات البعدين، التي توصلنا إليها من منظور هيتيروتيك-E والنوع IIA، يمكن تتبعها بالانتقال إلى أي من صيغ نظريات الأوتار الثلاث الأخرى، فإننا بذلك نعرف أن كلاً من صيغ نظريات الأوتار الخمس تتضمن أغشية ذات بعدين كذلك.

ويثير ذلك سؤالين. السؤال الأول، هل الأغشية ذات البعدين هي العناصر الأساسية الحقيقية في نظرية الأوتار؟ والسؤال الثاني، وبعد أن حدثت القفزة الجريئة في سبعينيات وأوائل ثمانينيات القرن العشرين من الجسيمات النقاط عديمة البعد (البعد = صفر) إلى أوتار ذات بعد واحد، وكما رأينا الآن أن نظرية الأوتار تتضمن بالفعل أغشية ذات بعدين، فهل هناك عناصر ذات أبعاد أعلى من ذلك؟ وحتى كتابة هذا الكتاب لم تكن الإجابة عن هذين السؤالين معروفة تماماً، غير أن الموقف يبدو كما يلي.

نحن نعتمد بشدة على التناظر الفائق ليزودنا ببعض الإيضاح عن كل صياغة لنظرية الأوتار متخطين بذلك مصداقية منطقة طرق التقريب الاضطرابي. وبالتحديد، فإن خواص حالات BPS، وكتلها وشحنات قواها، كلها تتحدد بصورة متفردة عن طريق التناظر الفائق، الأمر الذي يسمح بفهم بعض خصائص الازدواج القوي الخاص بها من دون القيام بحسابات مباشرة ذات صعوبة لا يمكن تصورها. وفي الحقيقة، ومن خلال الجهود الأولية لكل من هورويتس وسترومنغر، وكذلك من خلال الأبحاث الرائدة التي تلت ذلك بواسطة بولتشينسكي ، فإننا الآن على دراية أكثر بحالات BPS. وتحديداً، فإننا لا نعرف فقط كتلتها وشحنات القوى التي تحملها بل إننا ندرك بوضوح الشكل الذي هي عليه. وربما يكون الشكل هو أكثر الأمور في التطور مفاجأة على الإطلاق. فبعض حالات BPS أوتار ذات بعد واحد، والبعض الآخر أغشية ذات بعدين. وقد أصبحت هذه الأشكال مألوفة الآن. لكن المفاجأة أن هناك أخرى لها ثلاثة أبعاد وأربعة أبعاد - وفي الحقيقة فإن مدى الاحتمالات يتضمن كل بعد فضائي حتى التاسع. وتضم نظرية الأوتار في الواقع - أو نظرية-M، أو أي اسم نختاره لها في النهاية - أجساماً ممتدة ذات عدد وافر من الأبعاد الفضائية المختلفة. وقد صك الفيزيائيون المصطلح ثلاثة-بران (Three-Brane) ليصفوا الأجسام ذات الأبعاد الفضائية الثلاثة، وكذلك أربعة-بران (Four-Brane) للأجسام ذات الأبعاد الفضائية

الأربعة، وهكذا حتى نصل إلى تسعة-بران (Nine-Brane) للأبعاد الفضائية التسعة (وبشكل عام فإن أي جسم له عدد P من الأبعاد الفضائية، حيث P عدد صحيح، فقد صك الفيزيائيون له المصطلح الجامد P-بران P-Brane). وتوصف الأوتار أحياناً باستخدام هذه المصطلحات بأنها واحد-بران، والأغشية بأنها اثنان-بران. وحقيقة أن كل هذه الأجسام الممتدة تشكل جزءاً من النظرية قد أدت ببول تاونسند أن يعلن عن "ديمقراطية البران" (Democracy of Branes).

وعلى الرغم من ديمقراطية البران، فإن الأوتار - أجساماً ممتدة ذات بعد واحد - حالة خاصة للأسباب الآتية. بيَّن الفيزيائيون أن كتلة الأجسام الممتدة لكل بعد، ما عدا تلك ذات البعد الواحد، تتناسب "عكسياً" مع قيمة ثابت ازدواج الوتر المصاحب لها عندما نكون في أي من مناطق الأوتار الخمس في الشكل رقم (12-11). ويعني ذلك أنه مع الازدواج الضعيف للأوتار في أي من الصيغ الخمس، سيكون كل شيء هائل الكثافة ما عدا الأوتار - أثقل بصورة هائلة من كتلة بلانك. ولكونها على هذه الدرجة من الثقل، ولأن $E = mc^2$، فإن تكوينها يتطلب طاقة عظيمة لا يمكن تخيلها، وللبران (Branes) تأثير ضئيل على معظم الفيزياء (لكن ليس على كل الفيزياء، كما سنرى في الفصل القادم). ومع ذلك، إذا خاطرنا بالخروج من مناطق أشباه الجزر في الشكل رقم (12-11)، فإن البرانات ذات الأبعاد الأعلى تصبح أخف وزناً وبالتالي تكتسب أهمية متزايدة[15].

وبذلك، فإن الصورة التي يجب أن تأخذها في اعتبارك هي كالتالي: في المنطقة الوسطى في الشكل رقم (12-11) هناك نظرية عناصرها الأساسية ليست فقط أوتارا أو أغشية، ولكن على الأرجح "برانات" (Branes) لها أبعاد متنوعة جميعها تقف على قدم المساواة بصورة أو بأخرى. وليس لدينا حالياً إدراك كامل عن الكثير من السمات الأساسية لهذه النظرية الشاملة. غير أن هناك أمراً واحداً نعرفه بالتأكيد، وهو أننا إذا انتقلنا من المنطقة الوسطى إلى أي منطقة من مناطق شبه الجزيرة، فإن الأوتار فقط (أو الأغشية المتجعدة لتبدو أشبه ما تكون بالأوتار، كما في الشكلين رقمي (12-7) و(12-8)) تكون على درجة من خفة الوزن لتدخل ضمن الفيزياء التي نعرفها - الجسيمات الواردة في الجدول رقم (1-

(15) مع ذلك، فعلينا أن نشير إلى انه حتى في مناطق أشباه الجزر هناك بعض الوسائل الغريبة والتي بواسطتها يمكن للأغشية (البران) أن تؤثر على الفيزياء المألوفة. فمثلاً، تم اقتراح أن الأبعاد الفضائية الثلاثة الممتدة قد تكون في الأصل أغشية ثلاثية (ثلاثة-بران) كبيرة وغير ملفوفة. وإذا كان الأمر كذلك، فإننا عندما نقوم بأعمالنا اليومية فإننا نسري داخل غشاء ثلاثي الأبعاد. وتجري الآن دراسات لمثل هذه الاحتمالات.

1) والقوى الأربع التي تتداخل من خلالها. ولم يتم تنقيح التحليل الاضطرابي الذي أجراه منظرو نظرية الأوتار على مدى ما يقرب من عقدين بدرجة كافية، ليكشف عن وجود الأجسام الممتدة فائقة الكتلة ذات الأبعاد الأخرى؛ فقد سادت الأوتار عملية التحليل وحصلت النظرية على تسمية أبعد ما تكون عن الديمقراطية - نظرية الأوتار. ومرة أخرى، فلنا كل الحق لبعض الاعتبارات في أن نهمل كل شيء في الشكل رقم (12-11) ما عدا الأوتار. وخلاصة العبارة فإن هذا ما فعلناه حتى الآن في هذا الكتاب. ونرى الآن، على الرغم من ذلك، أن النظرية في الواقع أكثر ثراءً من أي نظرية أخرى يمكن تخيلها.

خامس عشر: هل يجيب أي مما سبق عن الأسئلة التي ما زالت بدون حل في نظرية الأوتار؟

نعم ولا. لقد تمكنا من تعميق فهمنا بالتحرر من نتائج معينة، إذا استرجعناها لوجدناها ناتجة من التحليل التقريبي الاضطرابي وليس من فيزياء الأوتار الحقيقية. غير أن المدى الحالي لأدواتنا اللااضطرابية محدود جداً. واكتشاف الشبكة الرائعة لعلاقات الثنائيات قد مدنا ببصيرة أكثر عمقاً عن نظرية الأوتار، لكن ما زال الكثير من الموضوعات من دون حل. فعلى سبيل المثال، لا نعرف كيف نتجاوز المعادلات التقريبية لقيم ثابت ازدواج الأوتار - تلك المعادلات التي رأينا أنها تقريبية لدرجة أنها لا تقدم معلومات مفيدة. كما أننا لا نملك بصيرة أكبر من ذلك لمعرفة السبب وراء وجود ثلاثة أبعاد فضائية ممتدة فقط، أو كيف نختار الشكل التفصيلي للأبعاد المتجعدة. وتتطلب هذه الأسئلة طرقاً لا اضطرابية قد نقحت بشدة أكثر من تلك التي عندنا الآن.

ولا نملك الآن سوى فهم أعمق كثيراً للبنية المنطقية والأساس النظري لنظرية الأوتار. وقبل إدراك الموجز الموجود في الشكل رقم (12-11) كان سلوك الازدواج القوي لكل نظرية من نظريات الأوتار مثل صندوق أسود تام الغموض. كان عالم الازدواج القوي غير واضح المعالم، مثل الخرائط القديمة التي كانت تملأها أساساً أشكال التنين وشياطين البحر. ولكننا نرى الآن أنه بالرغم من أن الطريق إلى الازدواج القوي قد يسلك بنا مناطق غير مألوفة لنظرية-M، لكنه في النهاية سيحط بنا في جو مريح من الازدواج الضعيف - وإن يكن ذلك في لغة الثنائيات نظرية مختلفة للأوتار.

وتوحِّد الثنائية ونظرية-M النظريات الخمس للأوتار، وتقدم نتيجة هامة.

وربما لن تكون هناك مفاجآت أخرى بنفس أهمية تلك التي ناقشناها، وما زالت في انتظار أن نكتشفها. وعندما ينتهي رسام الخرائط من ملء كل المناطق على الكرة الأرضية تكون الخريطة قد أنجزت واكتملت المعرفة الجغرافية. ولا يعني ذلك أن الاستكشافات في القارة القطبية الجنوبية أو في جزيرة ميكرونيزيا (Micronesia) غير ذات مغزى علمي أو ثقافي. وما تعنيه فقط هو أن عصر الاكتشافات الجغرافية قد انتهى. ويؤكد ذلك غياب النقاط السوداء المجهولة من خريطة الكرة الأرضية. وتلعب "خريطة النظرية" في الشكل رقم (12-11) دوراً مشابهاً بالنسبة لنظرية الأوتار. ويغطي هذا الشكل المدى الكامل للنظريات التي يمكن الوصول إليها إذا بدأنا من بنية أية نظرية من النظريات الخمس للأوتار. ومع أننا بعيدون عن الفهم التام للأرض المجهولة في نظرية-M، إلا أنه لا توجد نقاط خالية على الخريطة. ومثل رسام الخرائط، يستطيع منظرو نظرية الأوتار أن يزعموا بتفاؤل حذر أن طيف النظريات المقبولة منطقياً قد تم وضعه كله على الخريطة في الشكل رقم (12-11). وتتضمن هذه الخريطة الاكتشافات النظرية الأساسية للقرن الماضي وهي النسبية العامة والخاصة، وميكانيكا الكم، والنظريات القياسية للقوى القوية والضعيفة والكهرومغناطيسية والتناظر الفائق والأبعاد الإضافية لكالوزا وكلاين.

والتحدي الذي يواجه منظري نظرية الأوتار - أو قد نقول منظري نظرية-M - هو كيف يبينون أن بعض النقاط على خريطة النظرية في الشكل رقم (12-11) تصف فعلاً عالمنا. وحتى نفعل ذلك فإن الأمر يتطلب إيجاد المعادلات الكاملة والدقيقة والتي ستؤدي حلولها إلى استخلاص النقاط المحيرة من الخريطة، ثم تسمح بفهم الفيزياء المقابلة بدقة كافية لمضاهاة ذلك بالنتائج التجريبية. وكما قال ويتن "إن إدراك ما تعنيه نظرية-M في الواقع - الفيزياء التي تتضمنها - يعني نقلة جذرية في فهمنا للطبيعة تضاهي على الأقل النقلات التي صاحبت الطفرات العلمية العظمى في الماضي"[16]. ويمثل ذلك برنامجاً للتوحد في القرن الحادي والعشرين.

(16) مقابلة مع إدوارد ويتن في 11 أيار/ مايو 1998.

الفصل الثالث عشر

الثقوب السوداء: منظور وتر/ نظرية ـM

كان التعارض الذي ساد قبل نظرية الأوتار بين النسبية العامة وميكانيكا الكم تحدياً لشعورنا العميق بأن قوانين الطبيعة لابد وأن تتوافق بعضها مع بعض بكل سلاسة في وحدة متكاملة. غير أن هذا التعارض أكثر من مجرد انفصال هائل. ومن غير الممكن إدراك الظروف الفيزيائية غير العادية التي حدثت عند لحظة الانفجار الهائل والتي تسود داخل الثقوب السوداء، إلا بصياغة كمية لقوى الجاذبية. وباكتشاف نظرية الأوتار فإننا نأمل في التوصل إلى حل لهذا الغموض الكبير. وسنرى في هذا الفصل وفي الفصول القادمة إلى أي مدى تمكن منظرو نظرية الأوتار من فهم الثقوب السوداء وأصل الكون.

أولاً: الثقوب السوداء والجسيمات الأولية

من الصعب لأول وهلة أن نتخيل شيئين يختلفان أحدهما عن الآخر بشكل حاد أكثر من اختلاف الثقوب السوداء والجسيمات الأولية. وعادةً ما نتصور الثقوب السوداء على أنها أعظم الأجرام السماوية ضخامة، بينما الجسيمات الأولية أكثر مكونات المادة ضآلة. غير أن أبحاث عدد من الفيزيائيين في نهاية الستينيات وبداية السبعينيات من القرن العشرين قد بينت أن الثقوب السوداء والجسيمات الأولية قد لا تكون مختلفة بهذا الشكل بعضها عن بعض كما نتصور. كان من هؤلاء الفيزيائيين ديمتريوس كريستودولو، وويرنر إسرائيل، وريتشارد برايس، وبراندون كارتر، وروي كير، ودافيد روبنسون، وهوكنغ، وبنروز . وجد هؤلاء الفيزيائيون أدلة مقنعة بشكل متزايد لما أوجزه جون ويلر في العبارة: "ليس للثقوب السوداء شعر". كان ويللر يعني بهذه العبارة أن كل الثقوب السوداء متشابهة ما عدا في بعض الصفات المميزة. فما هي تلك الصفات المميزة؟ ومن الطبيعي أن تكون كتلة الثقب الأسود هي إحدى تلك الصفات، فما هي الصفات الأخرى؟ كشفت الأبحاث أنها الشحنات الكهربية وشحنات بعض القوى الأخرى التي قد يحملها الثقب الأسود، وكذلك معدل الحركة المغزلية فيه. هذا هو

الوضع، فأي ثقبين أسودين لهما نفس الكتلة ونفس شحنات القوى ونفس الحركة المغزلية سيكونان تامي التناظر. وليس للثقوب السوداء "تسريحة شعر" جميلة - أي ليس لها مميزات ذاتية - التي تميز بعضها عن البعض الآخر. ولا بد من أن ينبهنا هذا إلى شيء هام. ولنسترجع أن هذه الصفات بالضبط - الكتلة وشحنات القوى والحركة المغزلية - هي التي تميز الجسيمات الأولية بعضها عن بعض. وقد أدى هذا التشابه في المميزات المحددة ببعض الفيزيائيين على مر السنين للاعتقاد الغريب بأن الثقوب السوداء قد تكون بالفعل جسيمات أولية عملاقة.

وفي الحقيقة، ووفقاً لنظرية آينشتاين، لا يوجد حد أدنى لكتلة الثقب الأسود. فإذا سحقنا وضغطنا قطعة من المادة لها أي كتلة إلى حجم صغير بما فيه الكفاية، فإن التطبيق المباشر للنسبية العامة يبين أنها ستصبح ثقباً أسود. (وكلما قلت الكتلة اضطررنا لضغطها إلى حجم أصغر). وهكذا يمكن أن نتخيل تجربة ذهنية نبدأ فيها بكتل من المادة متناهية الصغر وسحقناها لتصبح ثقوباً سوداء في غاية الضآلة، ثم قارنا خواص هذه الثقوب السوداء بخواص الجسيمات الأولية. وتقودنا مقولة ويلر عن عدم وجود الشعر لاستنتاج أن الثقوب السوداء ذات الكتلة متناهية الصغر، والتي تكونت بهذه الطريقة، ستبدو مشابهة جداً للجسيمات الأولية. وسيشبه الجميع كتلاً ضئيلة للغاية تتميز كلية بكتلتها وشحنات قواها وحركتها المغزلية.

لكن هنا مطب. فالثقوب السوداء المرصودة فلكياً ذات الكتل الأكبر كثيراً من الشمس، هي من الضخامة والثقل بحيث تصبح ميكانيكا الكم غير مناسبة، وما نحتاجه هو استخدام معادلات النسبية العامة لفهم خواصها. (ونحن هنا نناقش البنية العامة للثقب الأسود وليس نقطة الانهيار المركزية المفردة داخل الثقب الأسود، والذي يتطلب حجمه الضئيل وضعاً كمياً بكل تأكيد). وفي محاولاتنا للحصول على ثقوب سوداء أصغر فأصغر فإننا سنصل إلى نقطة عندما تكون تلك الثقوب صغيرة وخفيفة لدرجة أن ميكانيكا الكم يمكن تطبيقها. ويحدث ذلك عندما تصل الكتلة الكلية للثقب الأسود إلى كتلة بلانك تقريباً أو أقل من ذلك. (من وجهة نظر فيزياء الجسيمات الأولية، تعتبر كتلة بلانك هائلة - بضع مئات مليارات المليارات أكبر من كتلة البروتون. أما من وجهة نظر الثقوب السوداء فإن كتلة بلانك، والتي تساوي متوسط كتلة حبة واحدة من الرمل، ضئيلة جداً). وهكذا، فإن الفيزيائيين الذين تصوروا أن الثقوب السوداء الضئيلة والجسيمات الأولية قد تكون مرتبطة ارتباطاً وثيقاً بعضها ببعض قد اصطدموا مباشرة بعدم التوافق بين النسبية العامة - اللب النظري للثقوب السوداء - وميكانيكا الكم. وفي الماضي، أربك عدم التوافق هذا كل التقدم في ذلك الاتجاه المثير.

ثانياً: هل تسمح لنا نظرية الأوتار بالتقدم للأمام؟

أجل، إنها تسمح بذلك. تقدم نظرية الأوتار أول رابطة نظرية مدوية بين الثقوب السوداء والجسيمات الأولية من خلال الفهم الرفيع غير المتوقع للثقوب السوداء. كان الطريق إلى هذه الرابطة غير مباشر بعض الشيء، لكنه يأخذنا خلال بعض أكثر التطورات إثارة في نظرية الأوتار، مما يجعل الأمر رحلة تستحق العناء.

تبدأ الرحلة ببعض الأسئلة التي قد تبدو غير مرتبطة بالموضوع والتي حام حولها منظرو نظرية الأوتار منذ نهاية ثمانينيات القرن العشرين. كان الرياضيون والفيزيائيون يعلمون منذ مدة طويلة أنه عندما تتجعد ستة أبعاد فضائية لتكون أشكال كالابي-ياو، فإن هناك عموماً نوعين من الكرات المتضمنة في نسيج هذه الأشكال. وأحد هذين النوعين هو الكرات ذات البعدين مثل كرة الشاطئ التي لعبت دوراً حيوياً في تحولات تمزق الفضاء الفجائية في الفصل 11. أما النوع الثاني من الكرات فهو أصعب في تصوره، لكن له نفس الأهمية. فهي كرات ذات ثلاثة أبعاد - مثل أسطح كرات الشاطئ التي تزين الشواطئ الرملية للمحيط في عالم له أربعة أبعاد فضائية ممتدة. وكما ناقشنا في الفصل 11، من الطبيعي أن تكون كرة الشاطئ العادية في عالمنا هي جسم ذو ثلاثة أبعاد، لكن "سطحها" مثل سطح خرطوم المياه ذو بعدين: فأنت تحتاج فقط إلى عددين - خط عرض وخط طول مثلاً - لتحديد أي موقع على سطحه. غير أننا الآن نتخيل أن هناك بعداً فضائياً آخر: كرة شاطئ لها أربعة أبعاد بينما لسطحها ثلاثة أبعاد. وحيث أنه يكاد يكون مستحيلاً أن تتخيل مثل هذه الكرة في ذهنك، فإننا على الأغلب سنلجأ إلى التشبيه بأبعاد أقل، يمكن بسهولة تخيلها. لكن، وكما سنرى الآن، فإن أحد عناصر السطح الكروي ذي الأبعاد الثلاثة له أهمية أساسية.

وقد أيقن الفيزيائيون، بدراستهم لمعادلات نظرية الأوتار، أن هذا الأمر ممكن، بل الأكثر من ذلك، أنه بمرور الوقت فإن هذه الكرات ذات الأبعاد الثلاثة ستتقلص - تنهار - إلى حجم في غاية الضآلة. ويتساءل منظرو نظرية الأوتار، ما الذي قد يحدث إذا ما انهار نسيج الفضاء بهذا الشكل؟ وهل سيكون هناك بعض التأثيرات الكارثية لهذا النوع من انكماش النسيج الفضائي؟ ويشبه ذلك كثيراً السؤال الذي واجهناه وتوصلنا لحله في الفصل 11، لكننا هنا نركز على انهيار كرات ذات ثلاثة أبعاد، بينما في الفصل 11، كان التركيز منصباً فقط على انهيار الكرات ذات البعدين. (كما في الفصل 11، وحيث أننا نتخيل قطعة من شكل كالابي-ياو تتقلص، وليس الشكل كله، فإن المعالجة "نصف القطر الصغير/

نصف القطر الكبير" الموجودة في الفصل العاشر لا تنطبق هنا). وهنا يكمن الاختلاف الكيفي الأساسي الناتج عن التغير في الأبعاد[1]. ولنسْتَعِد من الفصل 11 التيقن الأساسي بأن الأوتار يمكن أن تقتنص كرات ذات بعدين أثناء حركتها خلال الفضاء. أي أن عالم الشريحة ذا البعدين يمكن أن يلتف تماماً حول كرة ذات بعدين كما في الشكل رقم (11–6). وقد ثبت أن ذلك كافٍ بالكاد للوقاية من أن تتسبب كرة ذات بعدين متقلصة ومنهارة في حدوث كوارث فيزيائية. لكننا الآن ندرس النوع الآخر من الكرات داخل فراغ كالابي-ياو، وهي كرات لها أبعاد أكثر بكثير لا تسمح بأن يلتف حولها وتر متحرك. وإذا كان هذا من الصعب عليك أن تتخيله، فإنه من الممكن تماماً أن تفكر في التشبيه المتضمن بعداً واحداً أقل (كل الأبعاد). ومن الممكن أن تتصور كرات ذات ثلاثة أبعاد على أنها أسطح ذات بعدين لكرات الشاطئ العادية، طالما كنت تتخيل أن الوتر ذا البعد الواحد عبارة عن جسيمة نقطة لا بعد لها. وعندئذ، وبالتشبيه بحقيقة أن الجسيمة النقطة عديمة البعد لا تستطيع أن تطوق أي شيء، فما بالك بكرة ذات بعدين، فإن الوتر ذا البعد الواحد لا يستطيع أن يطوق كرة ذات ثلاثة أبعاد.

وقد أدى مثل هذا المنطق بمنظري نظرية الأوتار إلى أن يخمنوا بأن على الكرات ذات الثلاثة أبعاد داخل فضاء كالابي-ياو أن تنهار، الأمر الذي بينت المعادلات التقريبية أنه من الممكن تماماً أن يحدث إن لم يكن تطوراً مألوفاً في نظرية الأوتار، مما قد يؤدي إلى نتائج كارثية. وفي الحقيقة، فإن المعادلات التقريبية لنظرية الأوتار التي تطورت قبل منتصف تسعينيات القرن العشرين يبدو أنها تشير إلى أن أحداث الكون قد تنسحق إلى توقف تام إذا كان لمثل هذا الانهيار أن يحدث. وقد بينت تلك المعادلات أن بعض اللانهائيات المعنية التي تم تطويعها بواسطة نظرية الأوتار قد ينفك رباطها بمثل هذا التقلص للنسيج الفضائي. كان منظرو نظرية الأوتار مضطرين للتعايش سنوات عدة مع هذا الفهم المقلق غير التام. غير أن أندرو سترومنغر في سنة 1995 بيّن أن هذه التخمينات عن الانهيار الشامل كانت خاطئة.

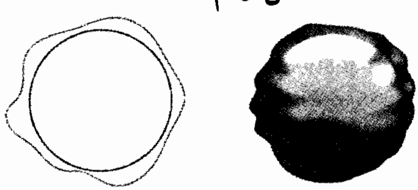
---

(1) سيعرف القارئ الخبير، انه في ظروف تناظر المرآة، فإن السطح الكروي ثلاثي الأبعاد المنهار على أحد أشكال كالابي-ياو سيرسم على شكل سطح كروي ثنائي الأبعاد منهار في مرآة فراغ كالابي-ياو - فيما يبدو أنه يرجعنا مرة ثانية إلى وضع الانقلابات التي ناقشناها في الفصل 11. غير أن الفرق هو أن إعادة الصياغة بواسطة المرآة لهذا النوع تؤدي إلى عدم التناظر لمجال $B_{\mu\nu}$ - القسم الحقيقي من صيغة كهلر المركَّبة على مرآة شكل كالابي-ياو - المختلفة، وهذا نوع صارخ للتفرد أكثر مما ناقشناه في الفصل الحادي عشر.

وبتتبع أبحاث ويتين وسيبرغ التي مهدت الطريق استفاد سترومنغر من الإدراك بأنه عند تحليل نظرية الأوتار بالدقة المكتشفة حديثاً في ثورة الأوتار الفائقة الثانية، فإن هذه النظرية ليست مجرد نظرية وتر ذي بعد واحد. وقد فسر ذلك كالآتي. الوتر ذو البعد الواحد - أو واحد-بران باللغة الجديدة في هذا المجال - يمكن أن يطوق تماماً جزءاً ذا بعد واحد من الفضاء على شكل دائرة كما هو موضح في الشكل رقم (13-1). (لاحظ أن هذا مختلف عن الشكل رقم (11-6) الذي فيه الوتر ذو البعد الواحد يطوق كرة ذات بعدين أثناء حركته في الفضاء. ولابد أن ننظر إلى الشكل رقم (13-1) على أنه لقطة أخذت في لحظة ما من الزمن). وبالمثل فإننا نرى في الشكل رقم (13-1) غشاء ذا بعدين - اثنان-بران - يمكن أن يلتف حول كرة ذات بعدين ويغطيها تماماً مثل قطعة من البلاستيك التي تلتف بإحكام حول سطح برتقالة. ومع أنه من الصعب أن نتخيل، فإن سترومنغر قد تتبع النسق وتيقن من أن المكونات ذات الأبعاد الثلاثة المكتشفة حديثا في نظرية الأوتار - ثلاثة-بران - يمكن أن تلتف حول كرة ثلاثية الأبعاد وتغطيها تماماً. وبعد أن تبصر ذلك الأمر بوضوح بيّن سترومنغر أن الثلاثة-بران الملفوفة تقدم درعاً مفصلاً بالضبط ليلاشي كل التأثيرات الكارثية المحتملة التي تخوف منظرو نظرية الأوتار في السابق من حدوثها إذا كان للكرة ثلاثية الأبعاد أن تنهار، وذلك من خلال حسابات فيزيائية قياسية بسيطة.

كان ذلك نظرة ثاقبة هامة ورائعة. غير أن مقدرتها الكاملة لم تتفتح إلا بعد فترة وجيزة.

الشكل رقم (13-1)



يمكن للوتر أن يطوق جزءاً من نسيج الفضاء ذا بعد واحد متجعد؛ أما الغشاء ذو البعدين فيمكن أن يلتف حول جزء ذي بعدين.

ثالثاً: تمزق نسيج الفضاء - عن اقتناع

تعد الكيفية التي تتغير بها الحالة المعرفية بين يوم وليلة، بمعنى الكلمة، من أكثر الأمور إثارة في الفيزياء. فقد قرأت المقال الذي أرسله سترومنغر للنشر

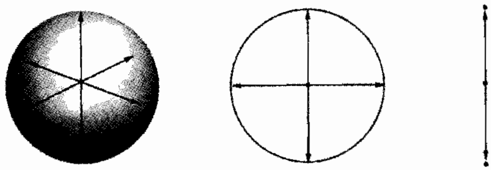
صبيحة اليوم التالي وذلك من أرشيف الإنترنت بعد أن استرجعته من الشبكة العالمية أثناء وجودي بمكتبي في جامعة كورنيل. وبضربة واحدة، تمكن سترومنغر من استخدام الأفكار المثيرة والجديدة لنظرية الأوتار في حل أحد الموضوعات الشائكة المتعلقة بتجعد الأبعاد الإضافية في أشكال كالابي-ياو. وعندما تمعنت في المقال فوجئت أنه ربما يكون قد حل نصف المشكلة فقط.

وفي أبحاث تمزق الفضاء في التحولات الفجائية المبكرة التي وصفناها في الفصل 11، قمنا بدراسة العملية ذات القسمين التي تتقلص بها كرة ذات بعدين إلى نقطة، مما يتسبب في تمزق نسيج الفضاء، ثم تستعيد الكرة ذات البعدين شكلها بطريقة جديدة تصلح من التمزق الذي حدث، وقد درس سترومنغر في هذا المقال ما الذي يحدث عندما تتقلص كرة ذات ثلاثة أبعاد إلى أن تصير نقطة، وبيّن أن الأجسام الممتدة المتكونة حديثاً في نظرية الأوتار تؤكد أن الفيزياء ما زالت مثالية في سلوكها. وكان ذلك آخر ما انتهى إليه المقال. فهل ترى من الممكن أن يكون هناك نصف آخر للرواية متضمناً مرة أخرى تمزق الفضاء ثم إصلاحه من خلال استعادة الكرات لأشكالها؟

كان ديف موريسون في زيارة لي في جامعة كورنيل أثناء الفصل الدراسي في ربيع العام 1995، وقد أخذنا نتناقش في مقال سترومنغر في فترة بعد الظهر. وفي غضون بضع ساعات توصلنا إلى إطار عام لما قد يبدو عليه "النصف الثاني للرواية". وبالاعتماد على بعض الأفكار الثاقبة التي ظهرت في أواخر ثمانينيات القرن العشرين، أيقنا أنه عندما تنهار كرة ذات ثلاثة أبعاد، فمن المحتمل أن يتمزق فراغ كالابي-ياو ثم يعيد إصلاح نفسه باستعادة الكرة انتفاخها. كانت هذه الأفكار من أبحاث علماء الرياضيات هيرب كليمنس من جامعة يوتا، وروبرت فريدمان من جامعة كولومبيا، ومايلز ريد من جامعة وارويك، كما استخدمها كانديلاس وغرين وتريستان هوبش الذين كانوا في جامعة تكساس بأوستين في ذلك الوقت. لكن كانت هناك مفاجأة هامة. فبينما كانت الكرة التي انهارت ذات ثلاثة أبعاد، كانت الكرة التي استعادت انتفاخها ذات "بعدين" فقط. ومن الصعب أن نتصور الشكل الذي يبدو عليه ذلك، لكننا يمكن أن نتخيل ذلك بالتركيز على التشبيه بالأشكال ذات الأبعاد الأقل. وبدلاً من الحالة التي يصعب تصورها لكرة ذات ثلاثة أبعاد في انهيارها لتحل محلها كرة ذات بعدين، فلنتصور كرة ذات بعد واحد تنهار لتحل محلها كرة لا بعد لها.

وبادئ ذي بدء، ما هي الكرات ذات البعد الواحد، وتلك التي بلا بعد؟ حسناً، لنلجأ إلى التشبيه للإجابة عن السؤال. فالكرة ذات البعدين عبارة عن تجمع

الشكل رقم (13-2)

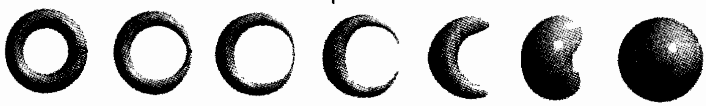


كرات ذات أبعاد يمكن بسهولة تخيلها - (a) بعدان، (b) بعد واحد، (c) بلا بعد.

نقاط فضاء ذي ثلاثة أبعاد على نفس المسافة من مركز مختار، كما هو مبين في الشكل رقم (13-2)، (a). وباتباع نفس الفكرة، فإن الكرة ذات البعد الواحد عبارة عن تجميع نقاط فضاء ذي بعدين (مثل هذه الصفحة) هي على نفس المسافة من مركز مختار. وكما هو مبين في الشكل رقم (13-2)، (b)، فهي ليست إلا دائرة. وفي النهاية، وباتباع نفس النسق، فإن الكرة التي بلا بعد عبارة عن تجميع نقاط لفضاء ذي بعد واحد (خط) على نفس المسافة من مركز مختار. وكما هو مبين في الشكل رقم (13-2)، (c)، فإن ذلك عبارة عن "نقطتين" لهما "نصف القطر" لكرة بلا بعد مساو للمسافة بين كل نقطة والمركز المشترك. وهكذا، فإن التشبيه بالأبعاد الأقل الذي ألمحنا إليه في المقطع السابق يتضمن دائرة (كرة ذات بعد واحد) عندما تتقلص متبوعة بتمزق الفضاء، ثم إحلال كرة بلا بعد محلها (نقطتان). ويضع الشكل رقم (13-3) الفكرة المجردة في قالب عملي.

ولنتخيل البداية على شكل سطح دونت (كعكة دائرية)، تضم كرة ذات بعد واحد (دائرة) كما هو واضح من الكرة المظللة في الشكل رقم (13-3). والآن لنتخيل أنه بمرور الوقت تنهار الدائرة المظللة مسببة تقلص نسيج الفضاء. ويمكن إصلاح هذا التقلص بالسماح لنسيج الفضاء بأن يتمزق لحظياً ليحل محل الكرة المتقلصة ذات البعد الواحد - الكرة المنهارة - كرة بلا بعد - نقطتان - تسد الثقوب في الأجزاء العليا والسفلى في الشكل الناشئ عن التمزق. وكما هو موضح بالشكل رقم (13-3)، فإن الأشكال الناتجة تشبه ثمرة موز ملتوية، يمكن إعادة تشكيلها بطريقة هادئة (بلا تمزق للفضاء) إلى سطح كرة شاطئ. ولذا عندما تنهار كرة ذات بعد واحد ويحل محلها كرة بلا بعد، فإن طوبولوجية الكعكة الأصلية، أي شكلها الأساسي، يتغير جذرياً. وفي سياق حديثنا عن الأبعاد الفضائية المتجعدة، فإن تسلسل تمزق الفضاء في الشكل رقم (13-3) قد يؤدي إلى العالم الذي تصورناه في الشكل رقم (8-8) والذي يتطور إلى ما تصورناه في الشكل رقم (8-7).

الشكل رقم (13-3)



قطعة دائرية من كعكة (طارة) تنهار إلى نقطة. يتمزق السطح منفتحاً ومؤدياً إلى ثقبين. و"تلتصق" مع بعضها (نقطتان) كرة بلا بعد لتحل محل الكرة الأصلية ذات البعد الواحد (الدائرة) مصلحة بذلك السطح الممزق. ويؤدي هذا إلى التحول إلى شكل مختلف تماماً - كرة الشاطئ.

ومع أن ذلك تشبيه بأبعاد أقل، إلا أنه يبين السمات الأساسية لما تنبأت به أنا وموريسون لنصف الرواية الثاني لسترومنغر. وبعد انهيار كرة ذات ثلاثة أبعاد داخل فراغ كالابي-ياو بدا لنا أن الفراغ يمكن أن يتمزق ثم يتبع ذلك إصلاح ذاتي وتتكون كرة ذات بعدين، الأمر الذي يؤدي إلى تغيرات طوبولجية هائلة أكثر من تلك التي وجدناها نحن وويتن في أبحاثنا المبكرة (ناقشناها في الفصل 11). وخلاصة القول، من الممكن بهذه الطريقة أن يحول أحد أشكال كالابي-ياو نفسه إلى شكل آخر من أشكال كالابي-ياو مختلف تماماً - بالضبط مثل تحول الدونت إلى كرة الشاطئ في الشكل رقم (13-3) - بينما تظل فيزياء الأوتار مثالية السلوك تماماً. وبالرغم من أن الصورة قد بدأت تتضح، إلا أننا كنا نعلم أن هناك أموراً هامة نحتاج للانتهاء منها قبل أن نعلن أن النصف الثاني من الرواية لا يقحم أي تفرد - أي له عواقب ضارة وغير مقبولة فيزيائياً. ذهب كل منا إلى بيته في هذا المساء بشعور متنام أننا قد وضعنا أيدينا على فكرة جديدة عظيمة.

رابعاً: فيض من البريد الإلكتروني

تلقيت في الصباح التالي بريداً إلكترونياً من سترومنغر يسألني عن أي تعليقات أو ردود فعل على مقاله. وقد أشار بقوله "لابد أن يرتبط هذا البحث مع أبحاثكم أنت وآسبينول وموريسون"، لأنه وكما اتضح في ما بعد كان هو الآخر يستكشف الارتباط المحتمل مع ظاهرة التغير الطوبولوجي. أرسلت له في التو بريداً إلكترونياً يصف المخطط التقريبي الذي وصلنا إليه أنا وموريسون. وقد اتضح من رده على هذه الرسالة أنه كان متحمساً بنفس درجة حماسنا أنا وموريسون منذ اليوم السابق.

وفي خلال الأيام القليلة التالية تبادلنا نحن الثلاثة سيلاً من البريد الإلكتروني بينما كنا نبحث بحمية لنضع الأساس الكمي لأفكارنا حول التغيرات الطوبولوجية

التي تمزق الفضاء. وببطء لكن بثقة اتخذت تفاصيل الأشياء مواضعها الصحيحة. وبحلول يوم الأربعاء التالي وبعد أسبوع من إعلان سترومنغر لأفكاره الأصلية، كان لدينا مسودة مقال مشترك يحدد التحولات الدرامية الجديدة لنسيج الفضاء الذي يتبع انهيار الكرة ذات الأبعاد الثلاثة.

كان سترومنغر على موعد لإلقاء محاضرة في جامعة هارفارد في اليوم التالي، ولذا غادر سانتا باربارا في الصباح الباكر واتفقنا نحن الثلاثة أن يقوم موريسون وأنا بوضع اللمسات الأخيرة للمقال وإرساله للنشر في الأرشيف الإلكتروني في نفس المساء - وبحلول الساعة 11.45 مساءً كنا قد راجعنا حساباتنا وأعدنا مراجعتها وبدا أن كل شيء متسق بعضه مع بعض تماماً. وهكذا أرسلنا بمقالنا بالطريقة الإلكترونية وغادرنا مبنى الفيزياء. وبينما كنا أنا وموريسون نسير في اتجاه سيارتي (كنت سأقوم بتوصيله لمنزله الذي استأجره لمدة فصل دراسي واحد) اتخذت مناقشتنا منحى نقدياً، حيث تخيلنا أكثر النقد قسوة الذي يمكن أن يجيء به أي أحد يرفض قبول نتائجنا. ومع مغادرتنا لساحة انتظار السيارات والخروج من حرم الجامعة أيقنا أنه على الرغم من أن حججنا قوية ومقنعة إلا أنها ليست محكمة تماماً. لم يشعر أي منا أن هناك أية فرصة حقيقية لأن يكون بحثنا على خطأ، لكننا أدركنا أن قوة ادعاءاتنا والأسلوب الذي اخترناه في كتابة المقال في بعض النقاط قد يسمح ببعض النقاش الموسوم بالحقد مما قد يحجب أهمية النتائج. وقد اتفقنا على أنه يكون من الأفضل أن نكتب البحث بطريقة أهدأ، لنخفض من حدَّة زعمنا ونسمح لمجتمع الفيزياء بالحكم على البحث في جوهره بدلاً من الحكم على طريقة تقديمه.

وأثناء قيادة السيارة ذكرني موريسون بأن قواعد النشر في الأرشيف الإلكتروني تسمح لنا بتنقيح البحث حتى الثانية صباحاً، حين يكون قد أصبح متاحاً للمطّلعين على شبكة الإنترنت. وفي هذه اللحظة استدرت بسيارتي لنعود إلى مبنى الفيزياء، واسترجعنا المقال الأصلي وبدأنا في إعادة الصياغة. ولحسن الحظ كان الأمر سهلاً تماماً. وقد أدى مجرد تغيير بعض الكلمات في المقاطع الهامة إلى تخفيف وقع ما زعمناه دون المساس بالمحتوى الفني. وفي غضون ساعة أعدنا إرسال المقال واتفقنا ألا نتحدث عنه بالمرة طوال قيادتي للسيارة وتوصيل موريسون لمنزله.

وبعد ظهر اليوم التالي كان واضحاً أن رد الفعل على مقالنا حماسي مشجع. ومن بين العديد من رسائل البريد الإلكتروني الذي استقبلناه كانت هناك رسالة من بليسير تحتوي على أعلى مجاملة يمكن أن يحصل عليها فيزيائي من فيزيائي آخر،

بأن قال: "كنت أتمنى أن أفكر أنا في ذلك!" وبالرغم من مخاوفنا في الليلة السابقة، فإننا قد أقنعنا مجتمع نظرية الأوتار أنه ليس نسيج الفضاء فقط هو الذي يتمزق بهدوء كما اكتشف من قبل (الفصل 11)، ولكن يمكن أن تحدث تمزقات أكثر حدة كذلك كما هو مصور بشكل تقريبي في الشكل رقم (13-3).

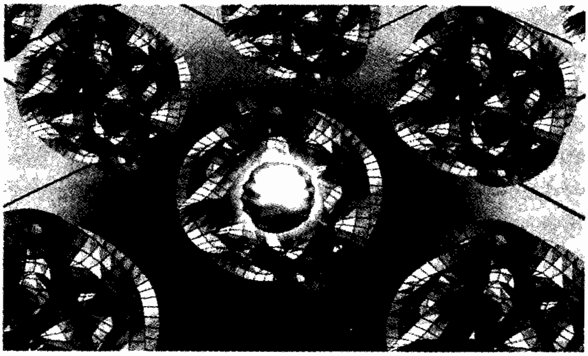
خامساً: العودة إلى الثقوب السوداء والجسيمات الأولية

ما علاقة هذا الأمر بالثقوب السوداء والجسيمات الأولية؟ الكثير. وحتى نرى ذلك علينا أن نسأل أنفسنا نفس السؤال الذي وضعناه في الفصل 11. ما هي النتائج الفيزيائية التي يمكن ملاحظتها نتيجة لمثل هذا التمزق لنسيج الفضاء؟ وبالنسبة للتحولات الفجائية، كما رأينا من قبل، فإن الإجابة المذهلة عن هذا السؤال هي أن لا يحدث الشيء الكثير بالمرة. أما بالنسبة للتحولات المخروطية Conifold Transitions - وهو الاسم التقني للتحولات الدرامية لتمزق الفضاء التي اكتشفناها الآن - فمرة أخرى لا تنتج كارثة فيزيائية (مثل تلك التي قد تنتج تبعاً للنسبية العامة المتفق عليها) غير أن هناك المزيد من النتائج المدوية التي يمكن ملاحظتها.

هناك مفهومان يتعلقان بهذه النتائج المشاهدة، وسنقوم بتفسير كل منهما بدوره. الأول، كما شرحنا من قبل، كان التقدم المفاجئ في أبحاث سترومنغر الأصلية هو إدراكه أن كرة ذات ثلاثة أبعاد داخل فراغ كالابي-ياو يمكن أن تنهار من دون إحداث كارثة، لأن الغشاء ثلاثة-بران الملفوف حولها يمنحها درعاً واقياً تماماً. لكن ما هو الشكل الذي عليه هذا الغشاء الملفوف؟ تكمن الإجابة عن هذا السؤال في الأبحاث المبكرة لكل من هورويتس وسترومنغر التي أظهرت للأشخاص من أمثالنا المدركين فقط للأبعاد الثلاثة الفضائية الممتدة، أن "ثلاثة-بران" المغلفة للكرة ثلاثية الأبعاد، سينتج منها مجال للجاذبية يظهر على شكل ثقب أسود[2]. وليس هذا الأمر واضحاً لكنه سيتضح فقط من الدراسة المتصلة للمعادلات التي تحكم الأغشية. ومرة أخرى، من الصعب رسم الأشكال ذات الأبعاد الأعلى بدقة على صفحة من الورق، لكن الشكل رقم (13-4) يعطي فكرة تقريبية لتشابه أقل أبعاداً يتضمن كرات ذات بعدين. ونرى أن غشاء ذا بعدين يمكن أن يلف نفسه حول كرة ذات بعدين (هي نفسها موجودة داخل فراغ كالابي-ياو

(2) وبصورة أكثر دقة، فإن هذه أمثلة للثقوب السوداء "القصوى" الطرفية، تلك الثقوب السوداء ذات الكتلة الدنيا التي تتواءم مع شحنات القوة الخاصة بها، تماماً مثل حالات BPS في الفصل الثاني عشر. وستلعب ثقوب سوداء مماثلة دوراً حيوياً في مناقشة أنتروبية الثقوب السوداء التالية.

الشكل رقم (4-13)



عندما يلتف الـ "بران" حول كرة في حدود الأبعاد المجعدة، فإنها ستبدو مثل ثقب أسود من وجهة نظر الأبعاد الممتدة المعتادة.

في بعض المواقع في الأبعاد الممتدة). فإذا نظر أحد من خلال الأبعاد الممتدة تجاه هذا الموقع سيشعر بالغشاء الملفوف عن طريق كتلته وشحنات القوى التي يحملها، أي تلك الخواص التي بيَّن هورويتس وسترومنغر أنها تشبه تماماً خواص الثقب الأسود. والأكثر من ذلك، زعم سترومنغر في مقاله عام 1995، الذي أحدث تقدماً فجائياً، أن كتلة الغشاء ثلاثة-بران - كتلة الثقب الأسود - ستتناسب طردياً مع حجم الكرة ذات الأبعاد الثلاثة التي تلتف حولها: كلما زاد حجم الكرة، أصبح الغشاء ثلاثة-بران أكبر ليتمكن من الالتفاف حول الكرة، وبالتالي ستزيد كتلته. وبنفس الشكل كلما صغر حجم الكرة، تقل كتلة الغشاء ثلاثة-بران الذي يلتف حولها. وعندما تنهار هذه الكرة، فإن الغشاء ثلاثة-بران الذي يلتف حولها، والذي يعتبر ثقباً اسود، يصبح أخف كثيراً. وعندما تنهار الكرة ذات الأبعاد الثلاثة لتصبح نقطة، فإن الثقب الأسود المصاحب لذلك - احبس أنفاسك - سيصبح عديم الكتلة. ومع أن ذلك يبدو في غاية الغموض - فما هو الثقب الأسود عديم الكتلة في هذا العالم؟ - سنقوم حالاً بربط هذه الأحجية بفيزياء الأوتار الأكثر ألفة لنا.

أما المفهوم الثاني الذي نحتاج لاسترجاعه فهو أن عدد الثقوب في شكل كالابي-ياو، كما هو وارد في الفصل التاسع، يحدد الأنساق الاهتزازية ذات الطاقة المنخفضة وبالتالي ذات الكتلة المنخفضة للأوتار، وهي تلك الأنساق التي من المحتمل أن تكون مسؤولة عن الجسيمات في الجدول رقم (1-1)، وكذلك عن حاملات القوة. وحيث أن التحولات المخروطية التي تمزق الفضاء تغير من

عدد الثقوب (كما في الشكل رقم (13-3) مثلاً، الذي استبعد منه ثقب الكعكة بواسطة عملية التمزيق والإصلاح)، فإننا نتوقع تغيراً في عدد الأنساق الاهتزازية ذات الكتلة المنخفضة. وبالفعل، عندما درسنا، موريسون وسترومنغر وأنا، هذا الأمر بالتفصيل، وجدنا أنه عندما تحل كرة جديدة ذات بعدين محل الكرة ذات الأبعاد الثلاثة المتقلصة في أبعاد كالابي-ياو المتجعدة، فإن عدد الأنساق الاهتزازية للأوتار عديمة الكتلة يزيد بمقدار واحد بالضبط. (مثال الكعكة التي تحولت إلى كرة شاطئ في الشكل رقم (13-3) قد يؤدي بنا للاعتقاد بأن عدد الثقوب - وكذلك عدد الأنساق - يتناقص، لكن اتضح أن هذه خاصية خادعة في التشبيه بالأبعاد الأقل).

وحتى نجمع بين المشاهدات المذكورة في المقطعين السابقين فلنتخيل سلسلة من اللقطات لفراغ كالابي-ياو الذي فيه يتناقص حجم كرة معينة ذات ثلاثة أبعاد أقل فأقل. وتتضمن الملاحظة الأولى أن الغشاء ثلاثة-بران الملتف حول هذه الكرة ذات الثلاثة أبعاد - الذي يبدو لنا كثقب أسود - ستتناقص كتلته إلى قيم أصغر فأصغر، وعند نقطة الانهيار النهائية سيصبح بلا كتلة. لكن، وكما تساءلنا من قبل، ما الذي يعنيه ذلك؟ وتصبح الإجابة واضحة بالاستشهاد بالملاحظة الثانية. بينت أبحاثنا أن الأنساق الجديدة عديمة الكتلة لاهتزازات الأوتار الناتجة من التحولات المخروطية لتمزق الفضاء هي "الوصف المجهري للجسيمة عديمة الكتلة التي تحول إليها الثقب الأسود". وقد استنتجنا أنه عندما يعاني أحد أشكال كالابي-ياو من تحولات مخروطية ممزقة للفضاء، فإن الثقب الأسود الذي له كتلة في البداية سيصبح أخف فأخف حتى يصير بلا كتلة ثم يتحول إلى جسيمة عديمة الكتلة - مثل الفوتون عديم الكتلة - الذي هو في نظر الأوتار ليس إلا وتر منفرد له نسق اهتزاز معين. وبهذه الطريقة تكون نظرية الأوتار، ولأول مرة، قد أسست مباشرة بوضوح وبطريقة كمية ترابطاً لا جدال فيه بين الثقوب السوداء والجسيمات الأولية.

سادساً: الثقوب السوداء "المنصهرة"

إن الارتباط بين الثقوب السوداء والجسيمات الأولية الذي اكتشفناه يشبه إلى حد كبير شيئاً مألوفاً لنا جميعاً من حياتنا اليومية، والمعروف تقنياً باسم "التحول الطوري" (Phase Transition). والمثال البسيط للتحول الطوري هو ذلك الذي ذكرناه في الفصل السابق: يمكن أن يتواجد الماء على شكل جامد (ثلج) وسائل (الماء السائل) وغاز (بخار). وتعرف هذه الأشكال بأطوار الماء، ويسمى التحول

من شكل لآخر "بالتحول الطوري". وقد بينا موريسون وسترومنغر وأنا أن هناك تشابهاً رياضياً وفيزيائياً قوياً بين مثل هذه التحولات الطورية والتحولات المخروطية الممزقة للفضاء لأحد أشكال كالابي-ياو إلى شكل آخر. ومرة أخرى، وكما حدث لشخص لم ير في حياته الماء السائل أو الثلج الجامد فلن يدرك في التو أنهما طوران لنفس المادة، فإن الفيزيائيين لم يدركوا في السابق أن أنواع الثقوب السوداء التي ندرسها والجسيمات الأولية ما هي إلا طوران لنفس المادة الوترية الأساسية في الواقع. فبينما تحدد درجة الحرارة الطور الذي يوجد عليه الماء، فإن الصيغة الطوبولوجية - الشكل - لأبعاد كالابي-ياو الإضافية تحدد ما إذا كان تركيب فيزيائي معين في نظرية الأوتار سيظهر كثقب أسود أو جسيمة أولية. أي أنه، في الطور الأول، الذي هو شكل كالابي-ياو الأصلي (المشابه لطور الثلج مثلاً)، نجد أن هناك ثقوباً سوداء معينة. وفي الطور الثاني، الذي هو شكل كالابي-ياو الثاني (المقابل لطور الماء السائل)، عانت هذه الثقوب السوداء تحولاً طورياً - أي أنها قد "انصهرت" مثلاً - إلى أنساق اهتزازية أساسية للأوتار. ويأخذنا تمزق الفضاء من خلال التحولات المخروطية من أحد أطوار كالابي-ياو إلى طور آخر. وأثناء ذلك نرى أن الثقوب السوداء والجسيمات الأولية، مثل الماء والثلج، وجهان لعملة واحدة. ونرى أن الثقوب السوداء تتواءم بشكل صميم داخل إطار نظرية الأوتار.

لقد استخدمنا عامدين نفس مثال التشبيه بالماء لهذه التحولات الجادة الممزقة للفضاء، وكذلك للتحولات من إحدى الصيغ الخمس لنظرية الأوتار إلى صيغة أخرى (الفصل 12) لأنها مرتبطة بشدة. ولنسترجع أننا قد عبرنا في الشكل رقم (12-11) عن أن النظريات الخمس للأوتار ثنائيات بعضها لبعض، ولهذا فإنها تتوحد تحت عنوان نظرية متفردة شاملة. ولكن هل تصمد المقدرة على التحرك المتصل من أحد الأوصاف إلى الآخر - لننطلق من أية نقطة على الخريطة في الشكل رقم (12-11) لنصل إلى أية نقطة أخرى - حتى بعد أن سمحنا للأبعاد الإضافية بالتجعد إلى أي شكل من أشكال كالابي-ياو؟ وقبل اكتشاف نتائج التغير الطوبولوجي الهائل، فإن الإجابة المتوقعة هي لا، حيث أنه لم تكن هناك طريقة معروفة للتحول المستمر من أحد أشكال كالابي-ياو إلى آخر. أما الآن، فإننا نرى أن الإجابة هي نعم: من خلال هذه التحولات المخروطية الممزقة للفضاء والمعقولة فيزيائياً، يمكننا تغيير أي شكل من أشكال كالابي-ياو إلى الآخر بصفة مستمرة. ونرى أن كل البنى الوترية هي - مرة أخرى - أطوار مختلفة لنظرية واحدة، وذلك بتغيير ثوابت الازدواج وهندسة فراغات كالابي-ياو. وحتى بعد

تجعد كل الأبعاد الإضافية فإن وحدة الشكل رقم (12-11) تظل متماسكة بقوة.

سابعاً: أنتروبية الثقوب السوداء

ظل بعض أكثر الفيزيائيين النظريين شهرة لسنوات كثيرة يخمنون احتمالات وجود عمليات تمزق للفضاء وكذلك وجود رابطة بين الثقوب السوداء والجسيمات الأولية. ومع أن مثل هذه التخمينات كانت تبدو كالخيال العلمي، إلا أن اكتشاف نظرية الأوتار ومقدرتها على دمج النسبية العامة مع ميكانيكا الكم قد سمح لنا بغرس هذه الاحتمالات بشدة على جبهة العلم المتقدم. وقد تجرأنا بفضل هذا النجاح على التساؤل عما إذا كانت أية خواص غامضة أخرى لعالمنا استعصت بعناد على الحل لعقود طويلة يمكن لها أيضاً أن تخضع لمقدرة نظرية الأوتار. كان مفهوم "أنتروبية الثقوب السوداء" على رأس هذه الخواص. وكانت تلك هي الساحة التي استعرضت فيها نظرية الأوتار عضلاتها عندما حلت بنجاح معضلة ذات أهمية خاصة دامت على مدى ربع قرن.

والأنتروبية هي مقياس لعدم الترتيب أو العشوائية، فعلى سبيل المثال إذا كان مكتبك مزدحماً بكتب مفتوحة نصف مقروءة طبقات فوق طبقات وجرائد قديمة ورسائل دعاية، فإن المكتب يكون في حالة عدم ترتيب قصوى أو "أنتروبية مرتفعة". ومن جهة أخرى، إذا كان المكتب مرتباً تماماً والموضوعات مرتبة أبجدياً في ملفاتها، والجرائد موضوعة بعناية بحسب تاريخها، والكتب مصفوفة في ترتيب أبجدي تبعاً لمؤلفيها والأقلام مرصوصة في المكان المخصص لها، فإن مكتبك في هذه الحالة في غاية النظام أو له "أنتروبية منخفضة". ويوضح هذا المثال الفكرة الأساسية، لكن الفيزيائيين أعطوا للأنتروبية تعريفاً كمياً يسمح بوصف أنتروبية شيء ما باستخدام قيم عددية محددة: فتعني الأرقام الأكبر أنتروبية أعلى والأرقام الأصغر أنتروبية منخفضة. ومع أن التفاصيل معقدة بعض الشيء إلا أن هذه الأرقام تعني، بشكل ما، إعادة الترتيب المحتمل للمكونات في نظام فيزيائي معين من دون المساس بمظهره العام. فعندما يكون مكتبك مرتباً ونظيفاً، فإن أي إعادة ترتيب - تغيير نظام الصحف والكتب والمقالات ونقل الأقلام من موضعها - سيحدث اضطراباً في التنظيم عالي الترتيب. وهو ما يعني أن له أنثروبية منخفضة. وعلى العكس، عندما يكون مكتبك في حالة يرثى لها من عدم الترتيب، فإن أي إعادة ترتيب للصحف والمقالات والبريد سيدعه كما هو في نفس الحالة من عدم الترتيب، وبالتالي لن يغير من مظهره العام. وهو ما يعني أن له أنتروبية مرتفعة.

وطبعاً، فإن وصف إعادة ترتيب الكتب والمقالات والصحف فوق المكتب - وتقرير أي ترتيب "يدع المظهر العام كما هو" - تنقصه الدقة العلمية. ويتضمن التعريف الدقيق للأنتروبية في الواقع حساب أو إحصاء عدد مرات إعادة الترتيب المحتملة للخواص الكمية المجهرية للمكونات الأصلية لنظام فيزيائي، والتي لا تؤثر في خواصه الماكروية العامة (مثل طاقته أو ضغطه). وليست التفاصيل أساسية طالما أنك تدرك أن الأنتروبية هي مفهوم كمي تماماً لميكانيكا الكم يقيس بدقة عدم الترتيب الشامل لنظام فيزيائي.

قدم جاكوب بيكنشتاين اقتراحاً جريئاً سنة 1970، وكان وقتها طالب دراسات عليا تحت إشراف جون ويلر في جامعة برينستون. فقد اقترح فكرة مميزة عن أن الثقوب السوداء قد تكون لها أنتروبية - وقد تكون كميتها هائلة. كان بيكنشتاين مدفوعاً بالقانون الجليل الذي اختبر جيداً، "القانون الثاني للديناميكا الحرارية"، الذي ينص على أن أنتروبية أي نظام تتزايد باستمرار:

> يميل كل شيء إلى درجة أعلى من عدم الترتيب. وحتى لو أنك نظفت ونظمت مكتبك المكدس لتنقص من أنتروبيته فإن الأنتروبية الكلية المتضمنة لأنتروبية جسمك وهواء الحجرة ستزداد في الواقع. ولكي ترتب مكتبك ستستهلك طاقة، أي أنك ستحدث اضطراباً لبعض جزيئات الدهون في جسمك لتوليد هذه الطاقة من أجل عضلاتك، وبالقيام بعملية النظافة سيفقد جسمك حرارة ستحرك جزيئات الهواء المحيط نحو حالة أعلى من الاضطراب وعدم الترتيب. فإذا أخذنا كل هذه التأثيرات في الاعتبار فإنها ستعوض وتزيد عن النقص في أنتروبيّة مكتبك، وبالتالي ستزداد الأنتروبية الكلية.

وقد تساءل بيكنشتاين عما يحدث إذا كان تنظيف المكتب يتم بالقرب من أفق الحدث لثقب أسود وقد وضعت مضخة تفريغ لتسحب كل جزيئات الهواء المثارة من جديد من الغرفة إلى الأعماق المستترة داخل الثقب الأسود؟ ويمكن أن نذهب أبعد من ذلك: ماذا سيحدث لو سحبت المضخة كل الهواء وكل ما على المكتب وحتى المكتب نفسه إلى داخل الثقب الأسود تاركة إياك في حجرة باردة لا هواء فيها في غاية الترتيب؟ وحيث أن الأنتروبية في حجرتك قد نقصت بالتأكيد، فإن بيكنشتاين قد فسر الطريقة الوحيدة للتواؤم مع القانون الثاني للديناميكا الحرارية بأن يكون للثقب الأسود أنتروبية، وأن هذه الأنتروبية ستزيد كلما دخلت المواد إلى الثقب الأسود وذلك لتعادل النقص في الأنتروبية الملاحظ خارج الثقب الأسود.

وفي الحقيقة استطاع بيكنشتاين الاعتماد على نتائج أبحاث ستيفان هوكنغ الشهيرة لتقوية موقفه. فقد بين هوكنغ أن مساحة أفق الحدث لثقب أسود تتزايد باستمرار في أي تداخل فيزيائي - للتذكير، إن هذه منطقة اللاعودة التي تلف كل ثقب أسود. وقد شرح هوكنغ أنه إذا سقط شهاب في ثقب أسود أو التحم غاز من نجم قريب مع ثقب أسود أو إذا تصادم ثقبان أسودان واتحدا، ففي كل هذه العمليات وفي العمليات الأخرى ستزيد المساحة الكلية لأفق الحدث للثقب الأسود دائماً. وتبعاً لبيكنشتاين فإن التطور الحتمي تجاه مساحات كلية أكبر تشير إلى وجود ارتباط بالتطور الحتمي في اتجاه الأنتروبية الكلية الأعلى المتضمنة في القانون الثاني للديناميكا الحرارية. وقد اقترح أن مساحة أفق الحدث لثقب أسود تمثل مقياساً دقيقاً لأنتروبيته.

وبالفحص الأدق، اتضح وجود سببين وراء اعتقاد الفيزيائيين بأن فكرة بيكنشتاين يمكن أن تكون على خطأ. السبب الأول، تبدو الثقوب السوداء ضمن أكثر الأجسام ترتيباً وتنظيماً في كل الكون. فبمجرد قياس كتلة ثقب أسود وشحنات القوى التي يحملها وحركته المغزلية فإن كنهه يكون قد تحدد بدقة عالية. وبمثل هذا العدد الضئيل من الصفات المحددة، فإن الثقب الأسود يبدو وكأنه تنقصه البنية اللازمة لحدوث عدم الترتيب. وتماماً مثل حركة المكتب إذا كان عليه فقط كتاب واحد وقلم واحد، فإن فرصة عدم الترتيب قليلة، كذلك الثقوب السوداء تبدو أبسط من أن يكون لها عدم ترتيب. أما السبب الثاني في أن اقتراح بيكنشتاين من الصعب هضمه، هو أن الأنتروبية، كما ذكرنا آنفاً هي مفهوم من مفاهيم ميكانيكا الكم، بينما كانت الثقوب السوداء، حتى وقت قريب، أسيرة المعسكر المضاد للنسبية العامة الكلاسيكية بعنف. وفي أوائل سبعينيات القرن العشرين، وبدون وسيلة لدمج النسبية العامة وميكانيكا الكم، بدا من غير الملائم في أحسن الظروف أن نناقش الأنتروبية المحتملة للثقب الأسود.

ثامناً: كيف يكون الأسود أسود؟

ما مدى سواد الأسود؟

وكما اتضح في ما بعد، كان هوكنغ كذلك يفكر في التشابه بين قانونه الخاص بزيادة مساحة الثقب الأسود وقانون الزيادة الحتمية للأنتروبية، لكنه أهمل هذا التشابه على أنه ليس أكثر من مجرد مصادفة. وفي النهاية، واعتماداً على قانونه (هوكنغ) الخاص بزيادة المساحة والنتائج الأخرى التي توصل إليها هو

وجيمس باردين، وبراندون كارتر، دفع هوكنغ بأنه إذا أخذ شخص التشابه بين قوانين الثقوب السوداء وقوانين الديناميكا الحرارية مأخذ الجد، فلن يكون مضطراً لتحديد مساحة أفق الحدث للثقب الأسود والأنتروبية، بل اتضح أنه لا بد أن يحدد كذلك "درجة حرارة" الثقب الأسود (باستخدام القيمة الدقيقة المعينة بواسطة شدة مجال جاذبية الثقب الأسود عند أفق الحدث الخاص به). غير أنه إذا كانت درجة حرارة الثقب الأسود ليست صغيرة - مهما كانت صغيرة - فإن المبادئ الأساسية والمستقرة تماماً في الفيزياء تتطلب أن يبعث الثقب بالإشعاعات مثل قضيب متوهج. غير أن الثقوب السوداء، كما يعرف ذلك كل إنسان، هي سوداء، ومن المفترض أنها لا تشع أي شيء. ولذلك اتفق هوكنغ ومعظم الآخرين على أن اقتراح بيكنشتاين مستبعد تحديداً. وبدلاً من ذلك كان هوكنغ على استعداد لتقبل فكرة أنه عندما تسقط مادة لها أنتروبية داخل الثقب الأسود فإن الأنتروبية تفقد بكل بساطة، الأمر الذي يتعارض تماماً مع القانون الثاني للديناميكا الحرارية.

كان هذا هو الحال حتى اكتشف هوكنغ في العام 1974 بالفعل شيئاً مثيراً للغاية. أعلن هوكنغ أن الثقوب السوداء "ليست" سوداء تماماً. فإذا أهملنا ميكانيكا الكم ولجأنا إلى القوانين الكلاسيكية للنسبية العامة، فإن الثقوب السوداء لا تسمح بكل تأكيد لأي شيء بالهرب من قبضة جاذبيتها - حتى الضوء، وهو ما كان قد اكتشف أصلاً منذ ستة عقود مضت. لكن تضمين ميكانيكا الكم يعدل من هذه الاستنتاجات بشكل مدوٍّ. وبالرغم من أنه لم يكن تحت تصرفه صورة من ميكانيكا الكم للنسبية العامة، إلا أن هوكنغ تمكن من إنجاز اتحاد جزئي ببراعة بين هاتين الأداتين النظريتين، الأمر الذي أدى إلى بعض النتائج المحدودة لكنها يمكن الاعتماد عليها. وكانت أهم نتيجة توصل إليها هي أن الثقوب السوداء تبعث بالفعل بإشعاعات تبعاً لميكانيكا الكم.

كانت الحسابات طويلة وشاقة، لكن فكرة هوكنغ الأساسية كانت بسيطة. وقد رأينا أن مبدأ عدم التيقن يؤكد أنه حتى فراغ الفضاء الخالي تملؤه جسيمات حقيقية تدور بهياج وتنبثق لحظياً إلى الوجود ثم يلاشي بعضها بعضاً. ويحدث هذا السلوك الكمي الجياش أيضاً في منطقة الفضاء المجاورة تماماً لأفق حدث الثقب الأسود. وقد أيقن هوكنغ مع ذلك أن المقدرة الهائلة لجاذبية الثقب الأسود من الممكن أن تحقن طاقة في زوج حقيقي من الفوتونات، فتبعدهما بعضهما عن بعض بدرجة كافية بحيث يُسحب أحدهما داخل الثقب. وحيث أن الفوتون الآخر قد فقد رفيقه في غياهب الثقب، فلن يكون له رفيق يتلاشى معه. وبدلاً من ذلك

فإن هوكنغ قد أوضح أن الفوتون المتبقي يحصل على جرعة من الطاقة من قوى جاذبية الثقب الأسود في الوقت الذي يتهاوى شريكه داخل الثقب، الأمر الذي يدفع بالشريك الحر بعيداً عن الثقب الأسود. كما أيقن هوكنغ أنه إذا نظر شخص ما إلى الثقب الأسود من مسافة آمنة، فإن التأثير الكلي لانفصال زوج الفوتونات الحقيقي والذي يتكرر حدوثه مرات متتالية حول أفق الثقب الأسود، سيظهر لهذا الشخص كتيار مستمر من إشعاعات منبعثة للخارج. إن الثقوب السوداء "تتوهج".

وأكثر من ذلك، استطاع هوكنغ أن يحسب درجة الحرارة التي يقدرها المشاهد من مسافة آمنة وترتبط بالإشعاع الصادر، وقد وجد أنها تتحدد بشدة مجال الجاذبية عند أفق الثقب الأسود، الأمر الذي يشابه تماماً العلاقة بين قوانين فيزياء الثقوب السوداء وقوانين الديناميكا الحرارية المقترحة من قبل[3]. لقد كان بيكنشتاين على حق: فقد بينت نتائج هوكنغ أن هذا التشابه لابد أن يؤخذ مأخذ الجد. وفي الحقيقة، بينت هذه النتائج أن الأمر أكثر من مجرد تشابه - إنه "تطابق". وللثقوب السوداء أنتروبية، ولها كذلك درجة حرارة. وقوانين الجاذبية في فيزياء الثقوب السوداء ليست إلا إعادة صياغة لقوانين الديناميكا الحرارية في ظروف جاذبية فائقة الغرابة. وكانت تلك قنبلة هوكنغ في العام 1974.

ولكي يكون لديك إحساس بالمقاييس المتضمنة، فقد اتضح أنه عندما يأخذ المرء كل التفاصيل في اعتباره بعناية، فإن للثقب الأسود ذي الكتلة الأكبر من كتلة الشمس ثلاث مرات درجة حرارة أعلى من الصفر المطلق بحوالى جزء من مائة من المليون من الدرجة. إنها ليست صفراً، لكنها قريبة جداً منه. فالثقوب السوداء ليست سوداء، لكنها تكاد تكون سوداء. ولسوء الحظ، فإن هذا الأمر يجعل انبعاث الإشعاعات من الصندوق الأسود شحيحاً جدا ومن المستحيل اكتشافه تجريبياً. ومع ذلك هناك استثناء. وقد بينت كذلك حسابات هوكنغ أنه كلما قلت كتلة الثقب الأسود زادت درجة حرارته وبالتالي زاد انبعاث الإشعاعات منه. فمثلاً، إذا كان الثقب الأسود في خفة كويكب صغير فإنه سيبعث بإشعاعات تعادل الإشعاعات الصادرة عن قنبلة هيدروجينية مقدارها مليون ميغا طن. وتكون هذه الإشعاعات مركزة في نطاق أشعة غاما من الطيف الكهرومغناطيسي. وقد جاب الفلكيون السماء بحثاً عن مثل هذه الإشعاعات، لكنهم، في ما عدا بعض الاحتمالات، خرجوا خلو اليدين، الأمر الذي يدل على أن مثل هذه الثقوب السوداء منخفضة الكتلة، إذا

(3) لا بد أن يكون الإشعاع المنطلق من الثقوب السوداء مشابها لذلك المنطلق من فرن ساخن - المشكلة نفسها التي ناقشناها في مستهل الفصل الرابع، والتي لعبت دوراً حيوياً في تطوير ميكانيكا الكم.

وجدت، فهي نادرة[4]. ويشير هوكنغ إلى ذلك مداعباً بقوله، إن هذا أمر ليس طيباً، لأنه إذا كانت إشعاعات الثقوب السوداء التي تنبأت بها أبحاثه من الممكن اكتشافها، فإنه بلا شك كان سيحصل على جائزة نوبل[5].

وعلى النقيض من درجة حرارة الثقب الأسود الأقل من جزء من المليون من الدرجة، فإن حساب الأنتروبية لثقب أسود كتلته ثلاثة أضعاف كتلة الشمس، ستعطي قيمة هائلة بكل تأكيد: واحد متبوعاً بـ 78 صفراً! وكلما زادت كتلة الثقب زادت الأنتروبية. وقد أرست نجاحات حسابات هوكنغ بلا نزاع أن هذا الأمر يعكس في الواقع الكمية الهائلة من عدم الترتيب المتضمنة داخل الثقوب السوداء.

لكن عدم ترتيب ماذا؟ فإن الثقوب السوداء، كما رأينا، تبدو أجساماً في غاية البساطة، فما هو مصدر عدم الترتيب الطاغي المذكور؟ وبالنسبة لهذا السؤال فإن حسابات هوكنغ لم تأت عليه بالمرة. ومن الممكن استخدام الدمج الجزئي للنسبية العامة وميكانيكا الكم الذي جاء به هوكنغ لإيجاد القيمة العددية لأنتروبية الثقب الأسود، من دون أن يقدم ذلك أي نظرة ثاقبة للمعنى المجهري للثقب الأسود. وقد حاول بعض أعظم الفيزيائيين على مدى ربع قرن تقريباً، أن يفهموا أي الخواص المجهرية للثقوب السوداء يمكن أن تكون مسؤولة عن الأنتروبية. لكن، من دون مزج تام بين ميكانيكا الكم والنسبية العامة، ما كانت لتتكشف اللمحات الخافتة للإجابة عن هذا السؤال. لكن الغموض ما زال سائداً.

تاسعاً: الدخول إلى نظرية الأوتار

أو، أنها قامت بذلك حتى كانون الثاني/ يناير 1996 عندما أرسل سترومنغر وفافا بحثاً للأرشيف الإلكتروني للفيزياء - اعتماداً على وجهات النظر السابقة لكل من ساسكيند وسين - بعنوان "الأصل المجهري لأنتروبية بيكنشتاين - هوكنغ". استطاع سترومنغر وفافا في هذا البحث أن يستخدما نظرية الأوتار لتحديد المكونات المجهرية لنوع معين من الثقوب السوداء ويحسبا بدقة الأنتروبية المصاحبة لها. وقد اعتمد بحثهما على مقدرة مكتشفة حديثاً ليدركا جزئياً التقريبات الاضطرابية المستخدمة في فترة ثمانينيات وتسعينيات القرن العشرين. وقد جاءت

(4) يتضح انه لأن الثقوب السوداء التي تتضمنها التحولات المخروطية الممزقة للفضاء هي طرفية، فإنها لا تشع تبعاً لهوكنغ، مهما كانت خفيفة.

(5) محاضرة ستيفن هوكنغ، في ندوة أمستردام حول الجاذبية والثقوب السوداء والأوتار، في 21 حزيران/ يونيو 1996.

النتائج التي وجداها مطابقة بالضبط لما تنبأ به بيكنشتاين وهوكنغ، مما أدى في النهاية إلى اكتمال الصورة التي كانت مرسومة جزئياً منذ أكثر من عقدين.

ركز سترومنغر وفافا على نوع من الثقوب السوداء يسمى "الثقوب السوداء المتطرفة" (Extremal). وهي ثقوب سوداء مشربة بشحنة - يمكن تخيلها على أنها شحنة كهربية - كما أن لها فوق ذلك أقل كتلة ممكنة تناسب الشحنة التي تحملها. وكما يمكن أن نرى من هذا التعريف، فهي قريبة الصلة بحالات BPS التي ناقشناها في الفصل 12. وفي الواقع، استغل سترومنغر وفافا هذا التناظر لأقصى درجة. وقد بيّنا أن في إمكانهما بناء ثقوب سوداء متطرفة معينة - بالطبع نظرياً - بادئين بمجموعة معينة من BPS بران (ذات أبعاد محددة) وربطها بعضها ببعض تبعاً لمخطط رياضي دقيق. وذلك بنفس الطريقة التي يمكن أن تبنى بها الذرة - ومرة ثانية، نظرياً - وذلك بادئين بحزمة من الكواركات والإلكترونات ثم تنظيمها بدقة لنحصل على بروتونات ونيوترونات محاطة بإلكترونات في مدارات حولها. وقد بيّن سترومنغر وفافا كيف أن بعض المكونات المكتشفة حديثاً في نظرية الأوتار يمكن صهرها بعضها مع بعض لتعطي ثقوباً سوداء معينة.

وفي الواقع، فإن الثقوب السوداء هي الناتج النهائي المحتمل لتطور النجوم. فبعد أن يستهلك النجم كل وقوده النووي خلال مليارات السنين من الاندماج الذري، لا تعود لديه المقدرة - الضغط الموجه للخارج - لمواجهة قوى الجاذبية الهائلة إلى الداخل. وفي ظل ظروف متباينة يؤدي ذلك إلى انهيار كارثي إلى الداخل للنجم ذي الكتلة الهائلة، فينهار بعنف تحت تأثير وزنه الهائل مكوناً ثقباً أسود. وعلى العكس من هذه الوسائل الواقعية لتكوين الثقوب السوداء، فإن سترومنغر وفافا دافعا عن فكرة "تصميم" الثقوب السوداء. وقد غيرا مفهوم تكوين الثقب الأسود رأساً على عقب وذلك بأن وضحا كيف أنه من الممكن بناؤه منهجياً - في خيال النظريين - عن طريق نسج تركيبة من الأغشية (بران) بدقة وعناية وبطء وحرفية شديدة معاً، تلك الأغشية التي انبثقت عن الثورة الثانية للأوتار الفائقة.

صارت مقدرة هذا المنطلق جلية في التو واللحظة. وتمكن سترومنغر وفافا بسهولة وبطريقة مباشرة من إحصاء عدد مرات إعادة ترتيب المكونات المجهرية للثقوب السوداء، التي لا تؤثر في الخواص المشاهدة، أي أن كتلتها وشحنات القوى تظل من دون تغير؛ وذلك بالحفاظ على التحكم النظري الكامل في التركيب المجهري للثقوب السوداء. وعندئذ يمكن مقارنة هذا العدد بمساحة أفق الثقب الأسود - الأنتروبية التي تنبأ بها بيكنشتاين وهوكنغ. وقد وجدا توافقاً تاماً

بينهما. وعلى الأقل بالنسبة لنوع الثقوب السوداء المتطرفة فقد نجحا في استخدام نظرية الأوتار للتوصل إلى المحتويات المجهرية والأنثروبية المصاحبة لها بالضبط. وهكذا تم حل اللغز الذي استمر لربع قرن[6].

يرى الكثيرون من منظري نظرية الأوتار في هذا النجاح دليلاً هاماً ومقنعاً مؤيداً للنظرية. وما زال فهمنا لنظرية الأوتار ليس من الدقة بحيث يمكننا من إجراء اتصال دقيق ومباشر مع المشاهدات التجريبية، مثل كتلة الكوارك أو كتلة الإلكترون. لكننا نرى الآن أن نظرية الأوتار قد زودتنا بأول تفسير أساسي لخاصية مستقرة من زمن طويل للثقوب السوداء أربكت الفيزيائيين الذين استخدموا النظريات المتفق عليها لسنوات عديدة. وترتبط هذه الخاصية بشدة بتنبؤات هوكنغ حول أنها لا بد من أن تبعث بإشعاعات، وهو التنبؤ الذي يمكن مبدئياً أن يخضع للقياس التجريبي. ويتطلب ذلك بالطبع أن نجد ثقباً أسود محدداً في السماء ثم نبني أجهزة حساسة لدرجة نتمكن بها من اكتشاف الإشعاعات التي يبعثها. فإذا كان الثقب الأسود خفيفاً بما فيه الكفاية، فإن الخطوة الأخيرة تكون في متناول التقانة الحالية. ومع أن هذا البرنامج التجريبي لم يصبه النجاح بعد، إلا أنه يعيد التأكيد على أن الصدع القائم بين نظرية الأوتار والمقولات الفيزيائية المحددة عن العالم الطبيعي يمكن رأبه. وحتى شيلدون غلاشو - الخصم الأكبر لنظرية الأوتار خلال الثمانينيات من القرن العشرين - قد صرح حديثاً "عندما يتكلم منظرو نظرية الأوتار على الثقوب السوداء فإنهم غالباً ما يتكلمون على ظاهرة يرونها - الأمر المثير للإعجاب"[7].

(6) وجد سترومنغر وفافا في حساباتهما الأصلية أن الرياضيات تصبح أسهل في حالة العمل على خمسة - وليس أربعة - أبعاد زمكانية ممتدة. وللغرابة، وبعد الانتهاء من حسابهما لأنتروبية مثل هذا الثقب الأسود خماسي الأبعاد، فإنهما أيقنا أنه لم يحدث أن قام أي عالم نظري من قبل بتصميم مثل هذا الثقب الأسود الطرفي الافتراضي ضمن النسبية العامة خماسية الأبعاد. وحيث انه فقط بمقارنة نتائجهما مع منطقة أفق الحدث لمثل هذا الثقب الأسود الافتراضي، يمكنهما التأكد منها، فإن ذلك مكنهما من تصميم مثل هذا الثقب الأسود خماسي الأبعاد رياضياً. وقد نجحا في ذلك. وبذلك أصبح الأمر بسيطاً لإظهار أن حساب الأنتروبية بواسطة نظرية الأوتار المجهرية متطابق مع ما يتنبأ به هوكنغ تأسيساً على مساحة أفق الحدث للثقب الأسود. غير أنه من المثير أن نتيقن أنه لأن حل معضلة الثقب الأسود قد وجد بعد ذلك، فإن سترومنغر وفافا لم يعرفا بالجواب الذي كانا يستهدفانه عندما قاما بحساب الأنتروبية. ومنذ ذلك الوقت، نجح العديد من الباحثين، على رأسهم كوريتس كالان الفيزيائي من جامعة برنستون، في تطبيق حسابات الأنتروبية على النظم الأكثر ألفة ذات الأبعاد الأربعة الزمكانية الممتدة، واتضح أن جميعها تتفق مع تنبؤات هوكنغ.

(7) مقابلة مع شيلدون غلاشو في 29 كانون الأول/ ديسمبر 1997.

عاشراً: الأسرار المتبقية للثقوب السوداء

وحتى بعد هذه التطورات المثيرة ما زال هناك سرّان أساسيان يكتنفان الثقوب السوداء. الأول يختص بتأثير الثقوب السوداء في مفهوم الحتمية. أعلن عالم الرياضيات الفرنسي بيير- سيمون دي لابلاس في بداية القرن التاسع عشر أكثر النتائج صرامة وتأثيراً لعلم الكون الذي يشبه الساعة ونتج من قوانين نيوتن للحركة:

> الذكاء الذي يمكن أن يدرك في لحظة معينة كل القوى التي بها تحيا الطبيعة، والوضع المتعلق بذلك للكائنات التي تكونها، إذا كانت هذه المكونات من الكبر بحيث يمكن إخضاع بياناتها للتحليل، فإنه (الذكاء) يمكن أن يتضمن في نفس المعادلة حركات الأجسام الكبرى في الكون وحركات أخف الذرات كذلك. ولمثل هذا الذكاء لا يوجد شيء غير مؤكد، فالمستقبل مثل الماضي مفتوح على مصراعيه أمام عينيه[8].

وبمعنى آخر، إذا كنت في لحظة معينة تعرف موقع وسرعة كل جسيمة في الكون فمن الممكن أن تستخدم قوانين نيوتن للحركة لتحديد - على الأقل من ناحية المبدأ - مكانها وسرعاتها في أية لحظة من الماضي أو المستقبل. ومن هذا المنظور فإن كل وجميع الأحداث، من تكوُّن الشمس إلى صلب المسيح، إلى حركة عينيك عبر هذه الكلمة، تأتي بصرامة نتيجة لموقع وسرعة المكونات المعينة في الكون منذ اللحظة الأولى بعد الانفجار الهائل. وتثير هذه النظرة الجامدة والمغلقة لحركة الكون كل أنواع المعضلات الفلسفية المحيرة التي تتعلق بحرية الإرادة، غير أن أهميتها تناقصت بشكل ملحوظ بعد اكتشاف ميكانيكا الكم. فقد رأينا أن مبدأ عدم التيقن لهيزنبرغ ينسف حتمية لابلاس، لأننا في الأساس لا نستطيع تحديد موقع وسرعة مكونات الكون بالضبط. وبدلاً من ذلك، فإن دوال الموجات الكمية قد حلت محل هذه الخواص الكلاسيكية، الأمر الذي ينبئنا بأنه لا يوجد إلا احتمالات لتواجد جسيمة ما في أي مكان، أو لأن تكون لها سرعة ما كذلك.

غير أن سقوط رؤية لابلاس لم يترك مفهوم الحتمية فاشلا تماماً. فتطور الدالات الموجية مع الزمن - احتمالات الموجات في ميكانيكا الكم - وفقاً

(8) Pierre Simone Laplace, *Philosophical Essay on Probabilities = Essai Philosophique sur les Probabilités*, Sources in The History of Mathematics and Physical Sciences ; 13 , Translated from the Fifth French Edition of 1825, with Notes by Andrew I. Dale (New York: Springer-Verlag, 1995).

لقواعد رياضية صارمة، مثل معادلة شرودنغر (أو مقابلها النسبي مثل معادلة ديراك ومعادلة كلاين - غوردون). ويدلنا ذلك على أن الحتمية الكمية قد حلت محل حتمية لابلاس الكلاسيكية: تسمح معرفة الدالات الموجية للمكونات الأساسية للكون في لحظة معينة من الزمن بوسيلة ذكية "بما فيه الكفاية" لتحديد الدالات الموجية في أي لحظة سابقة أو لاحقة. وتنبئنا الحتمية الكمية أن احتمال حدوث أي حدث معين في لحظة مختارة من المستقبل يمكن "تحديده تماماً" بمعرفة الدالات الموجية في أي لحظة سابقة. تخفف السمة الاحتمالية لميكانيكا الكم بشكل ملحوظ من حتمية لابلاس وذلك بالإزاحة الضرورية من المخرجات إلى مخرجات مثيلات لها، علماً بأن الأخيرة تتحدد تماماً ضمن الإطار المتفق عليه لنظرية الكم.

أعلن هوكنغ في العام 1976 أنه حتى هذه الصيغة الحتمية المخففة قد انتهكت بوجود الثقوب السوداء. ومرة أخرى، فإن الحسابات التي وراء هذا الإعلان معقدة، لكن الفكرة الأساسية مباشرة بشكل معقول. فعندما يسقط أي شيء في الثقب الأسود، فإن دالة موجته هي الأخرى في الثقب. غير أن هذا يعني أن البحث لإيجاد دالات موجية لكل الزمن المستقبل لا يمكن أن يتم باستخدام الوسائل الذكية "بما فيه الكفاية" لأنها ستكون خادعة وغير قابلة للإصلاح. وللتنبؤ بالمستقبل كلية نحتاج إلى معرفة كل الدالات الموجية اليوم معرفة تامة. لكن إذا أفلتت بعض هذه الدالات في غياهب الثقوب السوداء فإن المعلومات التي تحملها ستفقد.

ولأول وهلة، قد لا تثير التعقيدات الناشئة عن الثقوب السوداء القلق. فحيث أن كل شيء وراء أفق حدث الثقب الأسود قد انقطعت صلته تماماً بباقي الكون،ألا نستطيع بذلك أن نهمل أي شيء أسقطه سوء الحظ داخل الثقب الأسود؟ وعلاوة على ذلك، ومن وجهة نظر الفلسفة، ألا نستطيع القول بأن الكون لم يفقد في الواقع المعلومات التي حملتها تلك الأشياء التي سقطت داخل الثقب الأسود؛ فهي ببساطة قد حُبست في جزء من الفضاء الذي اخترنا نحن العقلاء أن نتجنبه بأي ثمن؟ وقبل أن يتحقق هوكنغ من أن الثقوب السوداء ليست سوداء تماماً، كان الجواب عن هذه الأسئلة سيكون نعم. لكن الرواية تغيرت بعد أن أخبر هوكنغ كل العالم بأن الثقوب السوداء تصدر إشعاعات. وحيث أن الإشعاع يحمل طاقة، والثقوب السوداء تصدر إشعاعات، لذا فإن كتلتها تتناقص ببطء - أي أنها تتبخر ببطء. وعندما تفعل ذلك فإن المسافة من مركز الثقب إلى أفق الحدث ستقل ببطء وينكشف الغطاء ببطء وتعود المناطق التي كانت معزولة في السابق إلى ساحة الكون. وهنا فإن على تأملاتنا الفلسفية أن تواجه الموسيقى:

هل سنسترجع المعلومات المتضمنة في الأشياء التي ابتعلتها الثقوب السوداء عندما تتبخر تلك الثقوب - البيانات التي تخيلنا وجودها داخل الثقوب السوداء؟ وهذه هي المعلومات المطلوبة لصحة الحتمية الكمية، وهكذا فإن هذا السؤال يتعلق بجوهر حقيقة ما إذا كانت الثقوب السوداء تشغل تطور الكون بما هو أعمق من مجرد حدث معين.

وحتى كتابة هذا الكتاب لا يوجد هناك إجماع بين علماء الفيزياء حول الإجابة عن هذا السؤال. فقد زعم هوكنغ بقوة وعلى مدى سنوات عديدة أن المعلومات لا تسترجع - أي أن الثقوب السوداء تحطم المعلومات وبالتالي فإنها "تدخل مستوى جديداً من عدم التيقن في الفيزياء، بالإضافة إلى عدم التيقن المعروف المصاحب لنظرية الكم"[9]. وفي الحقيقة فإن هوكنغ وكيب ثورن من معهد تقانة كاليفورنيا، قد راهنا جون بريسكل من معهد تقانة كاليفورنيا كذلك، بخصوص ما حدث للمعلومات التي اقتنصها ثقب أسود: قال هوكنغ وثورن أن المعلومات قد فقدت إلى الأبد، في ما اتخذ بريسكل الموقف المضاد وراهن أن هذه المعلومات تعود مرة أخرى عندما تصدر الثقوب السوداء إشعاعات وتتقلص. أما الرهان فقد كان المعلومات نفسها: كان على الخاسر (أو الخاسرين) مكافأة الفائز (أو الفائزين) بأية موسوعة يختارها.

ظل الرهان قائماً من دون تسوية، لكن هوكنغ اعترف مؤخرا أن المفهوم المكتشف حديثاً للثقوب السوداء من نظرية الأوتار - كما شرحنا ذلك سابقاً - يظهر أنه ربما تكون هناك طريقة لاسترجاع تلك المعلومات[10]. والفكرة الجديدة تتعلق بأن نوع الثقوب السوداء الذي درسه سترومنغر وفافا، وعدد كبير آخر من الفيزيائيين، منذ صدور بحثهما الأصلي، يمكن أن يختزن المعلومات ويسترجعها من المكونات الغشائية "بران". وقد صرح سترومنغر حديثاً بأن "هذه النظرية أدت إلى أن يرغب بعض منظري نظرية الأوتار في الزعم بأنهم قد انتصروا - يزعمون أن المعلومات تسترجع عندما تتبخر الثقوب السوداء. وفي اعتقادي أن هذه النتيجة سابقة لأوانها، فما زال هناك الكثير من الجهد نبذله لنرى ما إذا كان هذا صحيحاً"[11]. وفي نفس الوقت قال فافا: "أنا لا أدري بالنسبة لهذا

---

(9) Stephen Hawking and Roger Penrose, *The Nature of Space and Time,* The Isaac Newton Institute Series of Lectures (Princeton, NJ: Princeton University Press, 1996), p. 41.

(10) ستيفن هوكنغ، محاضرة في ندوة أمستردام حول الجاذبية والثقوب السوداء والأوتار في 21 حزيران/ يونيو 1997.

(11) مقابلة مع أندرو سترومنغر في 29 كانون الأول/ ديسمبر 1997.

السؤال - فمن الممكن لأي الاحتمالين أن يحدث"[12]. وتعد الإجابة عن هذا السؤال الهدف المحوري للأبحاث الحالية. وكما قال هوكنغ:

> يرغب معظم الفيزيائيين في الاعتقاد بأن هذه المعلومات لم تفقد، لأن ذلك سيجعل العالم آمناً يمكن التنبؤ بأحداثه. لكنني أعتقد أنه إذا أخذ المرء النسبية العامة لآينشتاين مأخذ الجد، فإن عليه أن يسمح بإمكانية أن ينطوي الزمكان على نفسه في عُقَد تخفي المعلومات داخل ثناياها. وتحديد ما إذا كانت هذه المعلومات تختفي بالفعل أم لا هو من الأسئلة الكبرى في الفيزياء النظرية اليوم[13].

أما السر الثاني في الثقوب السوداء الذي لم يحل بعد، فإنه يتعلق بطبيعة الزمكان عند نقطة مركز الثقب[14]. يبيِّن التطبيق المباشر للنسبية العامة الذي يرجع إلى شوارزتشايلد في العام 1916 أن الكتلة والطاقة الهائلتين ينسحقان معاً في مركز الثقب الأسود مما يسبب دمار نسيج الزمكان واعوجاجاً جذرياً يحوله إلى حالة من التحدب اللانهائي - أي يتقلص بفعل فردية الزمكان. وما يستنتجه الفيزيائيون من ذلك هو أن المادة التي تعبر أفق الحدث تسحب بإصرار إلى مركز الثقب الأسود، وهناك لن يكون لها مستقبل، ولذلك فإن الزمان نفسه ينتهي في قلب الثقب الأسود. أما الفيزيائيون الآخرون الذين درسوا على مدى سنوات طويلة خواص قلب الثقوب السوداء مستخدمين معادلات آينشتاين فقد كشفوا الاحتمال غير المعقول بأنه قد تكون هذه الثقوب بوابة لعالم آخر يرتبط بعالمنا برباط دقيق عن طريق مركز الثقوب السوداء فقط، وتقريباً عندما ينتهي الزمان في عالمنا يبدأ الزمان في العالم الآخر المرتبط به.

سنعرض لبعض التضمينات للاحتمالات المحيرة للذهن في الفصل التالي، أما الآن فإننا سنركز على نقطة مهمة. وعلينا أن نسترجع الدرس الرئيسي: فالكتلة التي في غاية الضخامة والحجم المتناهي الصغر تؤدي إلى كثافة من الارتفاع بحيث لا يمكن تصورها، مما يعطل صلاحية جوهر استخدام نظرية آينشتاين الكلاسيكية، ويتطلب أن نحشد ميكانيكا الكم في هذا الشأن. ويؤدي بنا ذلك إلى التساؤل، ما الذي تقوله نظرية الأوتار عن تفرد الزمكان في مركز ثقب أسود؟ وهو

---

(12) مقابلة مع كومرون فافا في 12 كانون الثاني/ يناير 1998.

(13) ستيفن هوكنغ، محاضرة في ندوة أمستردام حول الجاذبية والثقوب السوداء في 21 حزيران/ يونيو 1998.

(14) يتعلق هذا الموضوع بشكل ما بمسألة فقد المعلومات، كما افترض بعض الفيزيائيين على مر السنين بأنه يمكن أن توجد "كتلة" مدفونة في عمق الثقب الأسود تختزن فيها كل المعلومات التي جاءت بها المادة التي اصطادها الثقب الأسود.

موضوع البحوث المكثفة في الوقت الحالي، لكنه مثل السؤال حول فقد المعلومات، هو أيضاً لم تستقر الإجابة عنه بعد. وتتعرض نظرية الأوتار ببراعة لمجموعة أخرى من التفردات - تمزقات وتشققات الفضاء التي نوقشت في الفصل 11 وفي الجزء الأول من الفصل الحالي[15]. لكنك إذا شاهدت تفرداً واحداً فإن ذلك "لا يعني" أنك قد شاهدت كل التفردات. ويمكن لنسيج كوننا أن يتشقق ويثقب ويتمزق بطرق كثيرة ومختلفة. وقد أمدتنا نظرية الأوتار ببصيرة عظيمة لبعض هذه التفردات، لكن هناك تفردات أخرى راوغت منظري نظرية الأوتار ومنها تفرد الثقوب السوداء. ومرة أخرى، فإن السبب الرئيسي في ذلك هو الاعتماد على الأدوات الاضطرابية في نظرية الأوتار، التي تؤدي تقريباتها، في هذه الحالة، إلى حجب مقدرتنا على تحليل ما يحدث في نقاط العمق الداخلي للثقب الأسود بشكل كلي يمكن الاعتماد عليه.

وعلى كلٍ، وبعد التقدم الحديث الهائل في الطرق اللااضطرابية واستخدامها بنجاح في دراسة سمات أخرى للثقوب السوداء، فقد أصبح لمنظري نظرية الأوتار آمال عريضة في أنه لن يمضي وقت طويل قبل الكشف عن الأسرار الكامنة في مركز الثقوب السوداء.

(15) في الحقيقة، إن التحولات المخروطية الممزقة للفضاء التي ناقشناها في هذا الفصل تتضمن الثقوب السوداء، وعليه فإنها يمكن أن ترتبط بمسألة تفردها. ولنسترجع تمزق المخروط الذي يحدث عندما يفقد الثقب الأسود كل كتلته، وبذلك فإنه لا يرتبط مباشرة بالمسألة المتعلقة بتفرد الثقب الأسود.

الفصل الرابع عشر

تأملات في علم الكون

كان هناك دافع متقد للبشرية طوال التاريخ نحو فهم أصل الكون. وربما لم يكن هناك سؤال مفرد آخر قد ألهم خيال أسلافنا القدامى وكذلك أبحاث علماء الكوسمولوجيا (علم الكون) المعاصرين عبر مختلف الثقافات والعصور. وهناك في الأعماق كانت تكمن رغبة جماعية لتفسير سبب وجود العالم، وكيف اتخذ شكله الذي نراه الآن، وما هو المنطق - المبدأ - الذي يقوده في تطوره. والأمر المثير هو أن البشرية قد توصلت الآن إلى نقطة عندها ينبثق إطار للإجابة علمياً عن بعض هذه الأسئلة.

وتعلن النظرية العلمية المقبولة حالياً لخلق الكون أنه قد عانى ظروفاً قصوى - طاقة ودرجة حرارة وكثافة هائلة - في لحظاته الأولى. وتتطلب هذه الظروف، كما هو معروف الآن، أن نأخذ في الاعتبار كلاً من ميكانيكا الكم والجاذبية، وبالتالي فإن ميلاد الكون يقدم لنا ساحة عظيمة للتعبير في نظرية الأوتار الفائقة. وسنناقش هذا الفكر الوليد حالاً، لكن لنسْتَعِدْ بإيجاز قصة الكون ما قبل نظرية الأوتار، التي كان يشار إليها عادة باسم النموذج القياسي للكوسمولوجيا (أو لعلم الكون).

أولاً: النموذج القياسي للكوسمولوجيا، أو علم الكون

يرجع ظهور النظرية الحديثة لأصل الكون لعقد ونصف بعد اكتمال النسبية العامة لآينشتاين. ومع أن آينشتاين قد رفض أن يعطي نظريته قيمتها الحقيقية ويوافق أنها تتضمن أن الكون ليس أبدياً ولا ساكناً، غير أن ألكسندر فريدمان قد فعل ذلك. وكما ناقشنا في الفصل الثالث، فإن فريدمان قد وجد ما هو معروف الآن بأنه حل معادلات آينشتاين عن طريق الانفجار الهائل - وهو الحل الذي يعلن أن الكون قد انبثق عن حالة انضغاط لانهائية، وهو الآن في حالة تمدد بعد هذا الانفجار الأولي. كان آينشتاين على يقين لدرجة أنه نشر مقالاً قصيراً معلناً أن مثل هذه الحلول المتضمنة للتغيرات الزمنية ليست نتيجة لنظريته، وزعم أن هناك

خطأً قاتلاً في بحث فريدمان. إلا أنه بعد مرور ثمانية أشهر نجح فريدمان في إقناع آينشتاين بعدم وجود أخطاء، الأمر الذي جعل آينشتاين يسحب اعتراضه علناً لكن بأدب مصطنع. ومع ذلك، من الواضح أن آينشتاين لم يقتنع تماماً بأن نتائج فريدمان لها أية علاقة بالكون. غير أنه بعد حوالى خمس سنوات من ذلك، وبناءً على مشاهدات هابل التفصيلية للعشرات من المجرات بواسطة تلسكوب ذي مرآة مئة بوصة من مرصد ماونت ويلسون (Mount Wilson) فقد تأكد بما لا يدع مجالاً للشك أن العالم في حالة تمدد. وقد تمت إعادة صياغة أبحاث فريدمان بطريقة أكثر منهجية وكفاءة بواسطة الفيزيائيين هوارد روبرتسون وآرثر ووكر وهي ما زالت تشكل أساس الكوسمولوجيا الحديثة.

وبشيء أكثر من التفصيل فإن النظرية الحديثة عن أصل الكون تبدو كما يلي. منذ حوالي 15 مليار سنة انبثق الكون من حدث طاقيٍّ فريد هائل، لفظ كل الفضاء والمادة. (وليس عليك أن تبحث بعيداً عن موقع حدوث الانفجار الهائل، لأنه حدث في الموقع الذي أنت فيه وفي كل مكان آخر، ففي البداية كانت كل المواقع التي نراها منفصلة الآن، كانت "نفس" المكان). كانت درجة حرارة الكون بعد 10^{-43} ثانية على حدوث الانفجار الهائل، وهي اللحظة التي أطلق عليها "زمن بلانك"، قد حسبت ووجدت حوالي 10^{-32} كلفن، أي أنها أسخن بمقدار 10 تريليون تريليون مرة من أعمق مكان داخل الشمس. وبمرور الزمن تمدد الكون وأصبح أبرد، وأثناء ذلك بدأت المادة الكونية من البلازما الأولية المتجانسة والمتوهجة تشكل دوامات وتجمعات. وبعد حوالي جزء من مائة ألف جزء من الثانية تقريباً بعد الانفجار الهائل أصبحت الأشياء باردة بما يكفي (حوالي 10 تريليون كلفن - مليون مرة أسخن من جوف الشمس) لتتجمع الكواركات معاً في مجموعات من ثلاثة، مكونة البروتونات والنيوترونات. وبعد حوالي جزء من مائة من الثانية أصبحت الأمور صالحة لتكوين أنوية بعض أخف العناصر في الجدول الدوري لتبدأ في التجمد من بلازما الجسيمات التي تبرد. وخلال الدقائق الثلاث التالية، وعندما برد الكون الملتهب إلى حوالي مليار درجة، فإن الأنوية السائدة والتي انبثقت كانت أنوية الهيدروجين والهليوم، مع كميات ضئيلة من الديوتيريوم (الهيدروجين "الثقيل") والليثيوم. وتعرف هذه الفترة باسم "التخليق النووي البدائي (Primordial Nucleosynthesis)".

ولم يحدث الكثير في المائة ألف عام التي تلت ذلك أكثر من استمرار التمدد والتبريد. غير أنه عندما انخفضت درجة الحرارة إلى بضع ألوف من الدرجات، أخذت الإلكترونات المتدفقة بلا نظام تتباطأ للدرجة التي تمكنت عندها الأنوية

الذرية، غالباً الهيدروجين والهليوم، من اقتناصها لتكون أول الذرات المتعادلة كهربياً. كانت تلك اللحظة محورية: ومنذ تلك اللحظة أصبح العالم شفافاً على جميع المستويات. وقبل عصر اقتناص الإلكترونات كان الكون مليئاً ببلازما كثيفة من جسيمات مشحونة كهربياً - بعضها شحنته موجبة مثل الأنوية، بينما الأخرى لها شحنة سالبة مثل الإلكترونات. كانت الفوتونات المثارة، التي لا تتداخل إلا مع الجسيمات المشحونة، تسحب بإصرار بواسطة الكتلة الكثيفة للجسيمات المشحونة، فلا تستطيع أن تنتقل إلا لمسافات ضئيلة جداً قبل أن تنحرف أو تمتص. جعل حاجز الجسيمات المشحونة أمام الحركة الحرة للفوتونات الكون يبدو وكأنه معتم تماماً على الأغلب، تماماً مثل ما يمكن مشاهدته صباح يوم كثيف الضباب أو أثناء عاصفة ثلجية كثيفة جداً. غير أنه عندما دخلت الإلكترونات سالبة الشحنة في مداراتها حول الأنوية موجبة الشحنة مكونة ذرات متعادلة كهربياً، اختفى المانع المشحون وانقشع الضباب الكثيف. ومنذ تلك اللحظة أصبحت الفوتونات الناتجة عن الانفجار الهائل تنتقل من دون أية معوقات، وأصبحت تتضح رؤية كل مدى الكون تدريجياً.

وبعد حوالى مليار سنة أخرى، وبعد أن هدأ الكون بصورة محسوسة من البداية المجنونة، بدأت تنبثق المجرات والنجوم، وفي النهاية الكواكب كتجمعات للعناصر البدائية مرتبطة بواسطة الجاذبية. واليوم، وبعد ما يقرب من 15 مليار سنة من الانفجار الهائل يمكننا أن نبدي دهشتنا بكل من عظمة الكون ومقدرتنا الجماعية على أن نجمع معاً نظرية منطقية من السهل اختبارها عن أصل الكون.

لكن، إلى أي مدى يمكن أن نثق "حقيقة" في نظرية الانفجار الهائل؟

ثانياً: اختبار الانفجار الهائل

عندما ينظر الفلكيون في الكون بواسطة أقوى تلسكوباتهم، فإنهم يستطيعون أن يروا الضوء الذي انبعث من المجرات والكوازارات (Quasars) بعد بضعة مليارات من السنين منذ لحظة الانفجار الهائل. ويمكنهم ذلك من التحقق من تمدد الكون الذي تنبأت به نظرية الانفجار الهائل في هذا الطور المبكر من الكون، ومن أن كل الأمور كما تنبأوا بها. ولاختبار النظرية في أزمنة سابقة على ذلك فعلى الفيزيائيين والفلكيين أن يستخدموا طرقاً أخرى غير مباشرة. وتتضمن إحدى هذه الطرق الأكثر دقة ما يعرف باسم الخلفية الإشعاعية للكون.

إذا لمست بيدك إطار دراجة مباشرة بعد ملئه بالهواء بشدة فستشعر بأنه دافئ الملمس. تتحول بعض الطاقة التي أنفقتها في حركة ضخ الهواء إلى زيادة في درجة

حرارة الهواء داخل الإطار. ويعكس ذلك مبدأً عاماً: في ظروف مختلفة وعندما تنضغط الأشياء، فإنها تسخن. والعكس صحيح، فعندما يسمح للأشياء أن تتمدد فإنها تبرد. وتعتمد أجهزة التكييف والثلاجات على هذه المبادئ، فإذا عرَّضنا مواد مثل الفريون إلى دورات من الانضغاط والتمدد المتكررة (وبالمثل البخر والتكثيف) يحدث سريان للحرارة في الاتجاه المرغوب. ومع أن هذه حقائق بسيطة من حقائق الفيزياء الأرضية، فقد اتضح أن لها وجوداً مدوياً في الكون ككل.

وقد رأينا في ما سبق أن الإلكترونات والأنوية بعد أن ترتبط معاً لتكوِّن الذرات، فإن الفوتونات تصبح حرة في الانتقال من دون عائق خلال الكون. ويعني ذلك أن الكون مملوء "بغاز" من الفوتونات التي تنتقل في جميع الاتجاهات وتتوزع بتجانس في جميع أرجاء الكون. وعندما يتمدد الكون، يتمدد كذلك هذا التيار من غاز الفوتونات الحرة، لأنه في الأساس يعتبر الكون وعاء لها. وتماماً كما تنخفض درجة حرارة غاز مألوف (مثل الهواء في إطار دراجة) بالتمدد، كذلك تنخفض درجة حرارة غاز الفوتونات عندما يتمدد الكون. وفي الحقيقة أيقن الفيزيائيون منذ زمن بعيد - جورج غامو وتلاميذه رالف ألفر وروبرت هيرمان في خمسينيات القرن العشرين، وروبرت دايك وجيم بيبلس في منتصف ستينيات القرن العشرين - أن الكون اليوم لا بد أن يكون منفذاً لفيض متجانس من هذه الفوتونات البدائية، التي بردت عبر الخمس عشرة مليار سنة الماضية من عمر تمدد الكون إلى بضع درجات فوق الصفر المطلق[1]. في عام 1965 أنجز آرنو بنزياس وروبرت ويلسون من معامل بل بنيوجرسي، عن طريق الصدفة، واحداً من أهم الاكتشافات في عصرنا، وذلك عندما اكتشفا التوهج الذي تبع الانفجار الهائل بينما كانا يعملان في تثبيت هوائي لاستخدامه في الاتصال بالأقمار الصناعية. قامت البحوث التي تلت ذلك بتنقيح كل من النظرية والتجربة، ووصلت إلى ذروة القياس بواسطة القمر الصناعي لمسار أرضية الكون (COBE Cosmic Background Explorer) من ناسا NASA في أوائل تسعينيات القرن العشرين. وقد أكد الفيزيائيون والفلكيون بدرجة عالية من الدقة أن الكون مملوء بإشعاعات ميكروية، وذلك باستخدام هذه البيانات، (لو كانت عيوننا حساسة للموجات الميكروية لكنا شاهدنا وهجاً منتشراً في كل العالم من حولنا) درجة حرارتها حوالي 2.7 درجة

(1) بصورة أكثر دقة، فإن الكون لا بد أن يكون مليئاً بالفوتونات الناتجة من الإشعاع الحراري المنبعث من جسم له المقدرة على امتصاص الإشعاعات تماماً - "جسم أسود" في لغة الديناميكية الحرارية - في توافق مع مدى درجة الحرارة. وهذا نفس طيف الإشعاع المنبعث بواسطة الثقوب السوداء تبعاً لميكانيكا الكم كما فسره هوكنغ، أو المنبعث من فرن ساخن كما وضحه بلانك.

فوق الصفر المطلق، الأمر الذي ينطبق تماماً مع توقعات نظرية الانفجار الهائل. وللتعبير عن ذلك بدقة فإن كل متر مكعب من الكون - بما في ذلك الحيز الذي تشغله أنت الآن - يحتوي في المتوسط على حوالي 400 مليون فوتون، تكوِّن مجتمعة المحيط الكوني الشاسع للإشعاعات الميكروية، الذي يمثل صدى لحظة الخلق. وعندما تفصل كابل الاتصال عن طريق التليفزيون لتحوله إلى محطة قد أنهت إرسالها، فإن ما تشاهده مما يشبه الثلج على شاشة التليفزيون، ما هو في الواقع إلا الإشعاع الخافت المتبقي منذ لحظة الانفجار الهائل. ويؤكد هذا التوافق بين النظرية والتجربة صورة الانفجار الهائل للكون منذ اللحظة الأولى لتحرك الفوتونات بحرية عبر الكون، حوالى بضع مئات الألوف من السنين بعد الانفجار، وتكتب اختصاراً ATB أي After The Bang.

هل نستطيع أن نجري اختباراتنا على نظرية الانفجار الهائل في أزمنة سابقة على ذلك؟ نعم نستطيع ذلك. فباستخدام المبادئ القياسية للنظرية النووية وللديناميكا الحرارية يستطيع الفيزيائيون التوصل إلى تنبؤات محددة حول الانتشار النسبي للعناصر الخفيفة التي أنتجت أثناء فترة تخليق الأنوية البدائية، أي بين جزء من مائة من الثانية وبضع دقائق بعد الانفجار ATB. وتبعاً للنظرية مثلاً، فإن حوالي 23٪ من الكون لا بد أن يتكون من الهليوم. وبقياس انتشار الهليوم في النجوم والسدوم وقع الفلكيون على دعم مؤثر، وبالفعل كان تنبؤهم في محله تماماً. وربما كان التنبؤ الأكثر دوياً هو التأكد من نسبة انتشار الديوتيريوم، حيث إنه لا توجد في الأساس أية عملية فيزيائية فلكية سوى الانفجار الهائل يمكن أن يتحدد بها الوجود الضئيل لكن المؤكد في الكون. وتمثل التأكيدات لانتشار الهليوم والديوتيريوم، والليثيوم حديثاً، اختباراً حساساً لفهمنا لفيزياء الكون المبكر في أزمنة التخليق البدائي لها.

إن هذا شيء مؤثر بدرجة تدعو للزهو. فكل البيانات التي نملكها تؤكد أن نظرية الكوسمولوجيا قادرة على وصف العالم منذ جزء من المائة من الثانية ATB وحتى الآن، أي على مدى 15 مليار سنة. إلا أنه يجب ألا يغفل المرء حقيقة أن العالم حديث الولادة قد تطور بسرعة مذهلة. والكسور الضئيلة من الثانية الواحدة - الكسور الأقل "كثيراً" من جزء من المائة من الثانية - تشكل عصوراً كونية تشكلت خلالها سمات للعالم دامت بعد ذلك طويلاً. وهكذا، واصل الفيزيائيون الضغط محاولين تفسير الكون في أزمنة أبعد وأبعد (أقرب إلى لحظة الانفجار). وحيث أن الكون يصير أصغر وأسخن وأكثف كلما اتجهنا ناحية لحظة الانفجار الهائل، فإن الوصف الكمي الدقيق للمادة والقوى يصبح أكثر أهمية. وكما رأينا

من وجهات نظر أخرى في الفصول السابقة، فإن نظرية مجال الكم للجسيمة النقطة صالحة حتى تصبح طاقة الجسيمات حوالى طاقة بلانك. وفي مفهوم كوني، يحدث ذلك عندما يصبح كل الكون المعروف في حجم مضغة لها حجم بلانك، الأمر الذي يؤدي إلى كثافة في غاية الارتفاع لدرجة أنها تستعصي على مقدرتنا في إيجاد استعارة أو تشبيه لها: كانت كثافة الكون في زمن بلانك ببساطة جبارة. وفي ظروف مثل تلك الطاقة والكثافة الهائلة، لا يمكن التعامل مع الجاذبية وميكانيكا الكم كأمرين منفصلين كما في حالة نظرية مجال الكم للجسيمة النقطة. وبدلاً من ذلك، فإن الرسالة الرئيسية لهذا الكتاب هي أنه عند هذه الطاقة وما فوقها لا بد من اللجوء لنظرية الأوتار. وبمصطلح وقتي، فنحن نتعامل مع هذه الطاقات والكثافات عندما نختبر أزمنة سابقة لزمن بلانك، أي أقل من 10^{-43} ثانية ATB، وبذلك فإن هذا العصر المبكر هو الساحة الكونية لنظرية الأوتار.

ثالثاً: من زمن بلانك وحتى جزء من المائة من الثانية بعده

فلنتذكر أن القوى الثلاث اللاجاذبية تبدو أنها تمتزج بعضها ببعض في البيئة الساخنة جداً للكون المبكر، وذلك بالعودة إلى الفصل السابع (وبالأخص الشكل رقم (7-1)). وتبين حسابات الفيزيائيين عن كيفية تغير شدة هذه القوى مع الطاقة ودرجة الحرارة، أنه قبل حوالي 10^{-35} ثانية ATB، كانت القوى القوية والقوى الضعيفة والكهرومغناطيسية كلها موحدة في "قوة عظيمة" أو "قوة فائقة". وفي هذه الحالة كان الكون أكثر تناظراً بكثير مما هو عليه اليوم. ومثل التجانس الذي يحدث عندما نسخن مجموعة من الفلزات المختلفة لتتحول إلى مصهور سائل، فإن الاختلافات الملحوظة بين القوى كما نراها الآن كانت غير موجودة بسبب الطاقة ودرجة الحرارة الهائلتين في الكون المبكر جداً. وبمرور الوقت وتمدد الكون وتبريده، فإن صياغة نظرية مجال الكم تبين أن هذا التناظر كان لابد أن يقل بحدة من خلال عدد من الخطوات الفجائية، مؤدية في النهاية إلى شكل غير متناظر بالمقارنة بما هو مألوف لنا.

وليس من الصعب إدراك الفيزياء التي تكمن وراء مثل هذا الاختزال للتناظر، أو كما يطلق عليه "انكسار التناظر" "Symmetry Breaking" بدقة أكثر. تخيل وعاءً ضخما مملوءاً بالماء. تتوزع جزيئات الماء بتجانس في جميع أرجاء الوعاء، وبصرف النظر عن الزاوية التي ننظر منها فإن الماء سيظهر كما هو. ثم تابع وعاء الماء عند خفض درجة الحرارة. في البداية لن يحدث شيء، لكن على المستوى المجهري فإن متوسط سرعة حركة جزيئات الماء يتناقص، وهذا كل ما يحدث.

وعندما تنخفض درجة الحرارة إلى درجة الصفر السلزي(*)، فإن شيئاً جذرياً سيحدث. سيبدأ الماء السائل في التجمد ويتحول إلى ثلج جامد. وكما ناقشنا في الفصل السابق، فإن هذا مثال للتحول الطوري. وأهم ما يعنينا الآن هو ملاحظة أن التحول الطوري يؤدي إلى انخفاض مقدار التناظر لجزيئات الماء. فبينما يبدو الماء السائل على نفس الشكل مهما تغيرت زاوية الرؤية - فهو يبدو متناظراً دورانياً - لكن الثلج الجامد مختلف. فللثلج بنية بللورية، الأمر الذي يعني أنك إذا اختبرته بدقة معقولة، فإنه مثله مثل أية بلورة، سيبدو مختلفاً إذا نظرت إليه من زوايا مختلفة. وقد أدى التحول الطوري إلى نقص في مقدار التناظر الدوراني الظاهري.

ومع أننا قد ناقشنا مثالاً واحدا مألوفاً فقط، فإن هذا الأمر صحيح بشكل أكثر عمومية: عندما تنخفض درجة حرارة الكثير من الأنظمة الفيزيائية، فإنها ستعاني تحولاً طورياً عند درجة معينة، وهو التحول الذي سيؤدي نمطياً إلى خفض أو "كسر" بعض التناظرات السابقة. وفي الواقع يمكن للنظام أن يعاني سلسلة من التحولات الطورية إذا تغيرت درجة حرارته في مدى واسع بما فيه الكفاية. فالماء - مرة ثانية - يعطي مثالاً بسيطاً على ذلك. فإذا بدأنا بالماء في درجة حرارة أعلى من 100 سلزية، فسيكون في هذه الحالة غازاً أو بخاراً. وفي هذا الشكل فإن للنظام تناظراً أكبر من الحالة السائلة، حيث أن الجزيئات المستقلة قد تحررت من حالة الالتصاق بعضها ببعض في الحالة السائلة. وبدلاً من ذلك فإن كل الجزيئات ستدور في جميع الاتجاهات داخل الوعاء بنفس الدرجة، من دون أن تكون تجمعات "مختارة" أو مجموعات من الجزيئات المفردة التي تنتقي بعضها البعض لتكّون ترابطاً قوياً على حساب المجموعات الأخرى. وتسود ديمقراطية الجزيئات في درجات الحرارة المرتفعة بما فيه الكفاية. ومن الطبيعي أنه عند خفض درجة الحرارة أقل من 100 سلزية تبدأ قطيرات من الماء السائل في التكون أثناء العبور من الحالة الغازية إلى الحالة السائلة، ويتناقص التناظر. وباستمرار خفض درجة الحرارة يحدث شيء جوهري حتى نصل إلى درجة الصفر السلزي. وكما ذكرنا أعلاه، فإنه عند هذه الدرجة سيحدث التحول الطوري ماء سائل/ثلج جامد، الذي سيؤدي إلى تناقص آخر مفاجئ في التناظر.

ويعتقد الفيزيائيون أن الكون في ما بين زمن بلانك وجزء من المائة من الثانية ATB، قد سلك مسلكاً مشابهاً، ماراً على الأقل بتحولين طوريين مشابهين لمثال الماء. فعند درجة حرارة أعلى من 10^{28} كلفن، تبدو القوى اللاجاذبية الثلاث كقوة

(*) نسبة إلى سليوس الذي اخترع ميزان الحرارة المئوية (المترجم والمراجع).

واحدة، ومتناظرة كما يمكن للتناظر أن يكون. (وسنناقش في نهاية هذا الفصل تضمين نظرية الأوتار لقوى الجاذبية في هذا التجمع عند تلك الدرجات المرتفعة من الحرارة). وعندما تنخفض درجة الحرارة عن 10^{28} كلفن، يمر الكون بتحول طوري، حيث تتبلور كل قوة من القوى الثلاث خارجة من الاتحاد المشترك بطريقة مختلفة. ويبدأ هذا الاختلاف النسبي في الشدة وتفاصيل تأثير كل منها على المادة في التمايز. وهكذا فإن التناظر الواضح بين هذه القوى عند درجات الحرارة العالية ينكسر عندما يبرد الكون. ومع ذلك، فقد بينت أبحاث غلاشو وعبد السلام ووينبرغ[2] أنه ليست كل تناظرات درجات الحرارة العالية قد تلاشت: فما زالت القوى الضعيفة والقوى الكهرومغناطيسية متشابكة بشكل عميق. وبتوالي تمدد وتبريد الكون، لا شيء يحدث ظاهرياً حتى تنخفض درجة الحرارة إلى 10^{15} كلفن - حوالى 100 مليون مرة مثل درجة حرارة قلب الشمس - حيث يمر الكون بتحول طوري آخر يؤثر على القوى الكهرومغناطيسية والقوى الضعيفة. وعند هذه الدرجة يتبلوران خارجين من اتحادهما السابق الأكثر تناظراً. وباستمرار التبريد يزداد الاختلاف بينهما. ويُعد التحولان الطوريان مسؤولين عن التمايز الظاهر بين القوى اللاجاذبية الثلاث أثناء تأثيرها في أحداث العالم، ومع ذلك فإن هذا العرض الموجز لتاريخ الكون يبين أن تلك القوى مرتبطة بعمق بعضها مع بعض في الواقع.

رابعاً: الأحجية الكوسمولوجيا (الكونية)

تقدم الكوسمولوجيا لعصر ما بعد بلانك إطاراً أنيقاً ومتماسكاً من الممكن تتبعه حسابياً لفهم الكون منذ أدق اللحظات بعد الانفجار الهائل. لكن وكما هو الحال في معظم النظريات الناجحة، فإن بصيرتنا الجديدة ما زالت تثير المزيد من الأسئلة التفصيلية. وكما اتضح فإن بعض هذه الأسئلة لن تلغي السيناريو الكوني القياسي كما هو معروف الآن، إلا أنها تلقي الضوء على بعض الموضوعات الشائكة التي تشير إلى الحاجة إلى نظرية أكثر عمقاً. ولنركز على واحد من هذه الأسئلة، وهو ما يسمى بمعضلة الأفق Horizon Problem، وهي واحدة من أكثر الموضوعات أهمية في الكوسمولوجيا الحديثة.

بينت الدراسات التفصيلية للخلفية الإشعاعية الكونية أنه من دون النظر لأي اتجاه يُوجه إليه الهوائي الذي يقيس الإشعاع في السماء، فإن درجة حرارة الإشعاع كانت متطابقة في حدود جزء من 100000 جزء. وإذا فكرت في ذلك ولو للحظة

(2) انظر الفصل الخامس من هذا الكتاب.

قصيرة فستدرك أن هذا الأمر غريب تماماً. فكيف يتأتى لمواقع مختلفة من الكون تبعد بعضها عن بعض مسافات شاسعة نفس درجة الحرارة المتطابقة إلى هذه الدرجة من الدقة؟ والحل الطبيعي لمثل هذه الأحجية هو ملاحظة ما يلي. أجل، فإن مكانين متضادين قطرياً في السماء بعيدان تماماً أحدهما عن الآخر الآن، إلا أنهما كتوأم انفصلا عند الولادة أثناء اللحظات المبكرة الأولى للكون، (وكل شيء أيضاً) كانا قريبين جداً أحدهما من الآخر. وحيث أنهما قد انبثقا من نقطة مشتركة، فإنك قد تقول إنه ليس غريباً على الإطلاق أن يقتسما صفات مشتركة عامة مثل درجة الحرارة.

ويفشل هذا الأمر في تفسير الانفجار الهائل القياسي في الكوسمولوجيا. وهنا سنذكر السبب في ذلك، يبرد وعاء الحساء تدريجياً إلى أن يصل إلى درجة حرارة الغرفة لأنه في تماس مع الوسط المحيط الأبرد. فإذا انتظرت ما فيه الكفاية، فإن درجة حرارة الحساء والهواء المحيط تتساوى من خلال تلامسهما المتبادل. فإذا وضعت الحساء في ترموس فمن الطبيعي أنه سيحتفظ بحرارته لفترة أطول لأن التلامس أصبح أقل كثيراً مع الوسط المحيط. ويعكس ذلك أن التجانس في درجة الحرارة بين الجسمين يتوقف على الاتصال المستمر بلا عوائق. وحتى نختبر مقولة أن المواقع المنفصلة الآن بمسافات شاسعة من المكان لها نفس درجة الحرارة بسبب تماسها الأصلي، فإن علينا أن نختبر صحة تبادل المعلومات بينها في الكون المبكر. وفي البداية قد تعتقد أن المواقع كانت قريبة بعضها من بعض في الأزمنة المبكرة، ولذا كان الاتصال أسهل وأسهل. غير أن التقارب المكاني جزء واحد فقط من الرواية، أما الجزء الآخر فهو الفترة الزمنية لهذا التقارب.

وحتى نختبر هذا الأمر بشكل أشمل، فلنتصور أننا ندرس شريطاً سينمائياً لتمدد الكون، لكن دعنا نراه في الاتجاه العكسي بأن ندير الشريط في الاتجاه العكسي للزمن بدءًا من اليوم ومتجهين إلى لحظة الانفجار الهائل. وحيث أن سرعة الضوء تحدد سرعة أية إشارة أو معلومة من أي نوع أثناء انتقالها، فإن المادة في منطقتين من الفضاء تتبادل الطاقة الحرارية، وهكذا فإن أمامها فرصة تساوي درجة الحرارة فقط إذا كانت المسافة بينهما عند لحظة معينة أقل من المسافة التي قطعها الضوء منذ لحظة الانفجار الهائل. وهكذا، وعند استرجاع الشريط في الاتجاه العكسي من الزمن، سنرى تنافساً بين مدى اقتراب المناطق الفضائية ومدى الزمن الذي ستقطعه في الاتجاه المضاد بالنسبة لهما ليصبحا في مواقعهما. فمثلاً، وحتى تصير مسافة الفصل بين الموقعين الفضائيين 186000 ميل، فإن علينا أن نعيد الشريط إلى الخلف إلى زمن أقل من ثانية واحدة ATB، وحتى عندما يصيران على مسافة أقرب من هذه ، فإنهما ما زالا لا يؤثران بأي شكل بعضهما

في البعض، حيث أن الضوء قد يتطلب ثانية كاملة ليقطع المسافة بينهما(3). ومن أجل أن تصبح المسافة الفاصلة بينهما أقل من ذلك كثيراً، ولتكن مثلاً 186 ميلاً، فلا بد من إرجاع الشريط إلى زمن أقل من جزء من الألف من الثانية ATB، وهنا سنحصل على نفس النتيجة مرة ثانية: لا يستطيعان التأثير في بعضهما، لأن الضوء لن يستطيع قطع المسافة 186 ميلاً في هذا الزمن. وعلى نفس المنوال، إذا استرجعنا الشريط لزمن أقل من جزء من المليار من الثانية ATB لكي تصبح هاتان المنطقتان على مسافة قدم واحد الواحدة من الأخرى، فإنهما لن تؤثرا الواحدة في الأخرى كذلك لأنه لا يوجد زمن كافٍ منذ لحظة الانفجار للضوء ليقطع مسافة 12 بوصة (قدم واحد) بينهما. ويبين ذلك أنه ليس من الضرورة أن يؤدي الاقتراب المستمر لنقطتين في الفضاء إلى التلامس الحراري - مثل التلامس بين الحساء والهواء - الضروري ليصلا إلى نفس درجة الحرارة.

بيَّن الفيزيائيون أن هذه المشكلة قد نشأت بالضبط من النموذج القياسي للانفجار الهائل. كما أن الحسابات التفصيلية قد أظهرت أنه ليس هناك طريقة لتبادل الطاقة الحرارية بين مناطق الفضاء التي تفصلها مسافات كبيرة حالياً، الأمر الذي لن يؤدي إلى تساوي درجتي حرارتهما. وحيث أن كلمة أفق Horizon تشير إلى آخر مدى رؤيتنا - أي أبعد مسافة يقطعها الضوء - فإن الفيزيائيين يطلقون على التجانس غير المفسر لدرجة الحرارة خلال المسافات الشاسعة للكون "معضلة الأفق". ولا تعني الأحجية أن النظرية القياسية للكون على خطأ. غير أن التجانس في درجة الحرارة يشير بشدة إلى أننا نفتقد جزءاً هاماً من الرواية الكونية. وقد قام الفيزيائي آلان جث في العام 1979، وهو من معهد ماسيتشوسيتس للتكنولوجيا الآن، بكتابة الفصل الناقص في الرواية.

(3) تنقل المناقشة روح الموضوع على الرغم من أننا نتغاضى عن بعض السمات الدقيقة المتعلقة بحركة الضوء في عالم يتمدد، والتي تؤثر في القيم التفضيلية. وعلى وجه التحديد، وعلى الرغم من أن النسبية الخاصة تنص على أنه لا يمكن لأي شيء أن ينتقل أسرع من سرعة الضوء، فإن ذلك لا يحول دون تباعد فوتونين كل منهما عن الآخر في نسيج فراغ يتمدد بسرعة تفوق سرعة الضوء. فمثلاً، في اللحظة التي أصبح فيها الكون شفافاً لأول مرة، أي بعد حوالي 300 ألف سنة من لحظة الانفجار الهائل ATB، كان يمكن للمواقع في السماوات التي تبعد بعضها عن بعض بحوالي 900 ألف سنة ضوئية أن تؤثر بعضها في بعض حتى لو كانت المسافة بينها تتعدى 300 ألف سنة ضوئية. وقد جاء معامل الزيادة بمقدار ثلاثة أضعاف نتيجة أن الذي يتمدد نسيج فضائي. ويعني ذلك أننا لو أرجعنا الشريط الكوني للوراء بالنسبة للزمان، وبعودتنا إلى 300 ألف سنة ATB، فإن نقطتين في السماوات تحتاجان فقط إلى أن تكونا على بعد أقل من 900 ألف سنة ضوئية الواحدة عن الأخرى، ليكون لكل منهما تأثير في درجة حرارة الآخر. ولا تغير هذه التفاصيل من السمات الكيفية لموضوعات المناقشة.

خامساً: التضخم

تتلخص جذور مشكلة الأفق في أنه لكي تقرِّب بين منطقتين إحداهما على مسافة شاسعة من الأخرى لا بد من أن نسترجع الشريط الكوني إلى الخلف في اتجاه بداية الزمن. وعلينا أن نرجعه للخلف للدرجة التي لا يصبح عندها الوقت كافياً لأي تأثير فيزيائي كي ينتقل من منطقة لأخرى. وتكمن الصعوبة لذلك في أنه عندما نسترجع الشريط الكوني للخلف ونقترب من الانفجار الهائل فإن الكون لا يتقلص بمعدل كاف.

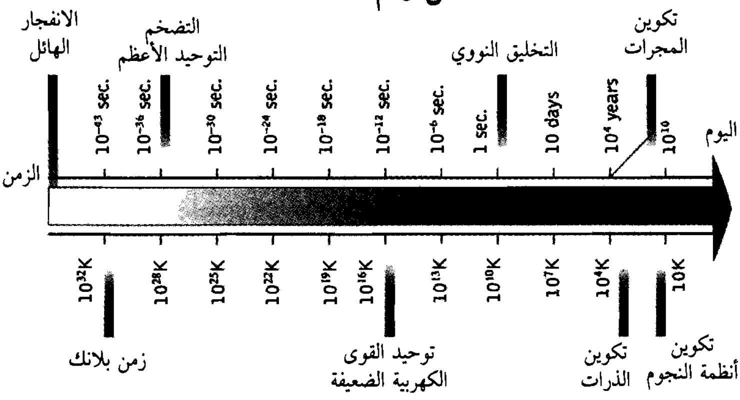
حسناً، إن هذه الأفكار تقريبية، لكنها تستحق أن نشحذها بعض الشيء. وتنبع معضلة الأفق من حقيقة أنها مثل كرة دفعت لأعلى، فإن قوى شد الجاذبية تتسبب في تباطؤ معدل تمدد الكون. ويعني ذلك، مثلاً، أنه لكي نقِّرب المسافة بين موقعين في الكون إلى النصف لا بد من أن نسترجع الشريط لأكثر من نصف الزمن في اتجاه البداية، وبالتالي فنحن نرى أنه لاختصار المسافة إلى النصف لا بد من أن نسترجع أكثر من نصف الزمن في اتجاه لحظة الانفجار الهائل. ويعني زمناً أقل منذ لحظة الانفجار - إذا تحدثنا نسبياً - أن اتصال المنطقتين سيزداد صعوبة، حتى ولو أصبحتا أكثر قرباً.

ويصبح من الأسهل الآن سرد مقولة جث عن معضلة الأفق. فقد وجد حلاً آخر لمعادلات آينشتاين والتي فيها يمر العالم المبكر جداً بفترة وجيزة من التمدد السريع الهائل - الفترة التي "يتضخم" فيها حجمه بمعدل غير مسبوق للتمدد الأسي. وعلى عكس حالة الكرة التي تتباطأ بعد دفعها إلى أعلى، فإن التمدد الأسي يصبح أسرع بمرور الزمن. وعندما نسترجع الشريط للخلف، فإن التمدد السريع الذي يتسارع يتحول إلى تقلص سريع متناقص. ويعني ذلك أنه لإنقاص المسافة إلى النصف بين موقعين في الكون (أثناء العصر الأسي) فإننا نحتاج لإرجاع الشريط للخلف فترة أقل من النصف - بل في الواقع أقل كثيراً. واسترجاع الشريط للخلف لزمن أقل يعني أن المنطقتين سيكون لديهما وقت أكبر للاتصال الحراري، ومثل الحساء الساخن والهواء، فإن لديهما الوقت الكافي بوفرة ليصلا إلى نفس درجة الحرارة.

ومن خلال اكتشاف جث التنقيحات الهامة التي قام بها كل من أندريه ليند الموجود بجامعة ستانفورد الآن، وبول ستاينهارد وأندرياس ألبريخت اللذين كانا موجودين في جامعة بنسلفانيا في ذلك الوقت وآخرين كثيرين، تجدد النموذج القياسي الكوني متحولاً إلى النموذج الكوني التضخمي Inflationary. وفي هذا الإطار عدل النموذج الكوني القياسي في الفترة الوجيزة جداً من الزمن - من

حوالي 10^{-36} إلى 10^{-34} ثانية ATB - حيث يتمدد الكون خلالها بمعدل هائل يصل على الأقل إلى 10^{30} مرة أكبر من معامل قيمته حوالي 100 لنفس الفترة من الزمن في سيناريو النموذج القياسي - ويعني ذلك أنه في لحظة خاطفة من الزمن حوالى جزء من تريليون من جزء من تريليون من جزء من تريليون من الثانية ATB تضخم حجم الكون بنسبة مئوية أكبر مما تم خلال 15 مليار سنة منذ تلك اللحظة. كانت المادة الموزعة الآن في جميع أرجاء الكون أقرب بعضها من بعض كثيراً قبل هذا التمدد تبعاً للنموذج التضخمي أكثر مما هو عليه في النموذج القياسي، الأمر الذي يجعل من الممكن إرساء درجة حرارة واحدة. ومن خلال الانفجار اللحظي لتضخم الكون - والذي تبعه التمدد الأكثر اعتياداً في النموذج الكوني القياسي - تتمكن هذه المناطق من التباعد على مسافات شاسعة نشاهدها الآن. وهكذا فإن التعديل الموجز - لكنه تضخمي بشكل كبير - لنموذج الكون القياسي يحل معضلة الأفق (كما يحل عدداً آخر من المعضلات لم نناقشها) ويكتسب قبولاً عريضاً بين علماء الكون(4).

الشكل رقم (1-14)



خط الزمن الذي يبين بعض اللحظات الهامة في تاريخ الكون.

يلخص الشكل رقم (1-14) تاريخ الكون منذ اللحظة التالية مباشرة لزمن بلانك وحتى الوقت الحاضر، وفقاً للنظرية الحالية.

(4) من أجل مناقشة أكثر تفصيلاً وحيوية عن اكتشاف نموذج التضخم الكوسمولوجي والمعضلات التي قام بحلها، انظر: Alan H. Guth, *The Inflationary Universe: The Quest for a New Theory of Cosmic Origins,* With a Forward by Alan Lightman (Reading, MA: Addison-Wesley Publishing, 1997).

سادساً: الكوسمولوجيا ونظرية الأوتار الفائقة

ما زالت هناك شريحة صغيرة في الشكل رقم (14-1) بين الانفجار الهائل وزمن بلانك لم نتعرض إليها بعد. وبالتطبيق الحرفي لمعادلات النسبية العامة على هذه الشريحة، وجد الفيزيائيون أن الكون يستمر حجمه في التناقص ويستمر في السخونة وزيادة الكثافة كلما تحركنا خلال الزمن في اتجاه الانفجار الهائل. وفي لحظة الصفر من الزمن، وعندما يتلاشى حجم الكون، تندفع درجة الحرارة والكثافة إلى ما لا نهاية، لتعطينا إشارة في غاية القوة عن أن هذا النموذج النظري للكون، الذي هو جزء لا يتجزأ من الإطار الكلاسيكي للجاذبية في النسبية العامة قد تحطم تماماً.

وتدلنا الطبيعة بشكل مؤكد أنه تحت مثل هذه الظروف علينا أن ندمج النسبية العامة وميكانيكا الكم، وبتعبير آخر لا بد من الاستفادة من نظرية الأوتار. وتعد الأبحاث التي تطبق نظرية الأوتار في علم الكون في مرحلة مبكرة من تطورها الآن. وتستطيع الطرق الاضطرابية في أحسن الأحوال أن تقدم بصيرة هيكلية، لأن الطاقة ودرجة الحرارة والكثافة الهائلة تتطلب جميعها تحليلاً دقيقاً. وبالرغم من أن ثورة الأوتار الفائقة الثانية قد قدمت بعض التقنيات اللا اضطرابية، إلا أنه سيمر بعض الوقت قبل أن نتمكن من استخدامها في أنواع من الحسابات تتطلبها العمليات الكوسمولوجيا (علم الكون). إلا أنه، وكما نعرف الآن، فإن الفيزيائيين خلال العقد الأخير قد اتخذوا الخطوات الأولى نحو فهم الكوسمولوجيا الوترية (علم الكون الوتري String Cosmology)، وسنعرض في ما يلي ما توصلوا إليه.

يبدو أن هناك ثلاث طرق أساسية تعدل بها نظرية الأوتار من النموذج الكوني القياسي. فى الطريقة الأولى يتم ذلك بشكل يجعل البحوث الحالية تزداد وضوحاً، فنظرية الأوتار تعني أن الكون به ما يمكن أن يصل إلى أصغر حجم ممكن. الأمر الذي له نتائج مدوية لفهمنا للكون منذ لحظة الانفجار نفسه، عندما تزعم النظرية القياسية أن حجمه قد تقلص تماماً إلى الصفر. والطريقة الثانية أن لنظرية الأوتار ثنائية نصف القطر الصغير/ نصف القطر الكبير (يرتبط ذلك ارتباطاً وثيقاً بكونه يملك أصغر حجم محتمل)، الأمر الذي له أهمية كونية عميقة، كما سنرى حالاً. وأخيراً الطريقة الثالثة، حيث لنظرية الأوتار أكثر من ثلاثة أبعاد زمكانية، ومن وجهة نظر الكوسمولوجيا، لا بد أن نتعامل مع تطورها جميعاً. ولنناقش الآن هذه النقاط بتفصيل أكثر.

سابعاً: في البدء كانت هناك شذرة لها حجم بلانك

في أواخر ثمانينيات القرن العشرين، قام كل من روبرت براندنبرجر وكامرون فافا بالخطوات الهامة الأولى تجاه فهم كيفية استخدام السمات النظرية للأوتار في تعديل استنتاجات الإطار الكوني النموذجي. وقد توصلا إلى أمرين هامين. الأول أنه عند استرجاع الزمن للوراء تجاه البداية فإن درجة الحرارة تواصل الارتفاع حتى يصل حجم الكون في كل الاتجاهات إلى ما يقرب من طول بلانك. ولكن عندئذ، تكون درجة الحرارة قد وصلت إلى "النهاية العظمى" ثم تبدأ في "الانخفاض". وليس من الصعب تصور السبب الحدسي وراء ذلك. تصور للتبسيط أن كل الأبعاد الفضائية للكون دائرية (كما فعل براندنبرجر وفافا). وكلما رجعنا بالزمن إلى الوراء وتقلص نصف قطر كل دائرة، فإن درجة حرارة الكون سترتفع. غير أنه كلما تناقص نصف القطر تجاه طول بلانك ثم خلاله، فإننا نعلم من خلال نظرية الأوتار، أن ذلك مطابق فيزيائياً لتقلص الأوتار إلى طول بلانك ثم ارتدادها للتزايد في الحجم، وحيث أن درجة الحرارة تتجه للتناقص عندما يتمدد الكون فإننا نتوقع أن تكون المحاولة الشاقة لضغط الكون إلى حجم أصغر من بلانك تعني أن درجة الحرارة ستتوقف عن الارتفاع، لأنها وصلت إلى النهاية العظمى، ثم تبدأ في الانخفاض بعد ذلك. وقد استطاع براندنبرجر وفافا مع بعض التحقق من أن هذا هو ما يحدث بالتأكيد.

وقد أوصل ذلك براندنبرجر وفافا إلى الصورة الكونية التالية. في البداية كانت كل الأبعاد الفضائية في نظرية الأوتار متجعدة بعضها مع بعض بشكل محكم في أدنى حجم ممكن، يصل تقريباً لطول بلانك. كانت درجة الحرارة والطاقة مرتفعتين لكنهما ليستا ما لا نهاية، حيث أن نظرية الأوتار قد تجنبت دهاليز الحجم المتناهي في الصغر والمنضغط عند نقطة البداية. وفي لحظة بداية الكون هذه تكون كل الأبعاد الفضائية في نظرية الأوتار على قدم المساواة - تامة التناظر - وكلها متجعدة في شذرة متعددة الأبعاد لها حجم بلانك. ووفقاً لبراندنبرجر وفافا، يمر الكون عندئذ خلال أولى مراحله لنقص التناظر عندما نصل إلى قرب زمن بلانك، تتفرد ثلاثة أبعاد فضائية لتمتد بينما تحتفظ بقية الأبعاد الأخرى بحجمها الأصلي القريب من بلانك. وعندئذ تُعرف هذه الأبعاد الثلاثة بأنها هي الموجودة في سيناريو التضخم الكوني، ويبدأ زمن ما بعد بلانك في التطور كما في الشكل رقم (14-1) ليسود، وتتمدد هذه الأبعاد الثلاثة لتصل إلى شكلها الحالي.

ثامناً: لماذا ثلاثة؟

والسؤال الملح الذي يطرح نفسه هو، ما الذي يدفع تناقص التناظر لتتفرد ثلاثة أبعاد فضائية بالضبط فقط لتتمدد؟ أي أنه، من دون النظر للحقيقة التجريبية في أن ثلاثة أبعاد فضائية فقط هي التي تتمدد إلى الحجم الكبير الذي نلاحظه، فهل تقدم نظرية الأوتار تعليلاً أساسياً لعدم تمدد عدد آخر (أربعة، أو خمسة، أو ستة، وهكذا)، أو حتى بتناظر أكبر لماذا لم تتمدد كل الأبعاد الفضائية كذلك؟ جاء براندنبرجر وفافا بتفسير محتمل. ولنسترجع أن ثنائية نصف القطر الصغير/ نصف القطر الكبير في نظرية الأوتار تقوم على حقيقة أنه عند تجعد أحد الأبعاد على شكل دائرة فمن الممكن للوتر أن يلتف حولها. أدرك براندنبرجر وفافا أنه كما تلتف حلقة مطاطية حول الإطار الداخلي لدراجة، فإن الأوتار الملتفة تميل إلى تقييد الأبعاد التي تلتف حولها وتمنعها من التمدد. ولأول وهلة قد يبدو أن ذلك يعني أن كل واحد من هذه الأبعاد سيتم تقييده، حيث أن الأوتار تستطيع أن تلتف حولها وتفعل ذلك بالفعل. ونقطة الضعف هنا أنه عندما يتماس وتر ملتف ورفيقه الوتر المضاد (الوتر الذي يلتف حول البعد في الاتجاه المضاد) فإنهما يتلاشيان لينتجا وتراً غير ملفوف (Unwrapped). فإذا حدثت هذه العمليات بسرعة وكفاءة كافيتين فإن التقيد الذي يتسبب فيه ما يشبه الحلقة المطاطية سينعدم مما يسمح للأبعاد بالتمدد. وقد اقترح براندنبرجر وفافا أن هذا التناقص في التأثير الصارخ للأوتار الملتفة سيحدث فقط في الأبعاد الثلاثة الفضائية. وسنورد هنا السبب.

تصور جسيمتين نقطتين تتدحرجان على طول خط ذي بعد واحد مثل المدى الفضائي للأرض الخط. فإذا لم يكن لأحدهما نفس سرعة الآخر فإنه عاجلاً أو آجلاً سيلحق أحدهما بالآخر ويصطدم به. لاحظ أنه مع ذلك، إذا كانت هاتان الجسيمتان النقطتان يتدحرجان عشوائياً في مستوى ذي بعدين مثل المدى الفضائي للأرض المنبسطة، فمن الأرجح أنهما لن تصطدما الواحدة بالأخرى أبداً. فالبعد الفضائي الثاني يفتح عالماً جديداً لمسار كل جسيمة منهما، ولا تتقاطع هذه المسارات في معظم الأحيان مع بعضها في نفس النقطة ونفس اللحظة من الزمن. وفي حالة الأبعاد الثلاثة أو الأربعة أو الأكثر فإن احتمال عدم تقاطعها يزداد تأكيداً. أدرك كل من براندنبرجر وفافا أن الفكرة المشابهة لذلك تنطبق لو أحللنا حلقة أوتار تدور حول أبعاد فضائية محل الجسيمة النقطة. ومع أنه من الصعب جداً أن نرى ما إذا كانت هناك أبعاد فضائية دائرية ثلاثة (أو أقل) فإن وجود وترين ملتفين

حول تلك الأبعاد يزيد من احتمال تصادمهما مع بعضهما - مشابهين في ذلك لما يحدث لجسيمتين تتحركان في بعد واحد. غير أنه في وجود أربعة أو أكثر من الأبعاد المكانية، فإن احتمال تصادم الأوتار الملتفة يصبح أقل فأقل - مشابهين في ذلك ما يحدث للجسيمات النقاط في بعدين أو أكثر[5].

ويؤدي ذلك إلى الصورة التالية. في اللحظة الأولى من تاريخ الكون، تؤدي الاضطرابات الناشئة عن درجة الحرارة المرتفعة، لكنها محددة، إلى اندفاع كل الأبعاد الدائرية في محاولة للتمدد. وفي أثناء تلك المحاولات تقاوم الأوتار الملتفة هذا التمدد دافعة بالأبعاد إلى الوراء إلى حالتها الأصلية. بنصف قطر طول بلانك تقريباً. غير أنه إن عاجلاً أو آجلاً ستدفع التأرجحات الحرارية العشوائية لحظياً بثلاثة أبعاد لتنمو أكثر من غيرها. وهنا تظهر مناقشاتنا أن الأوتار التي تلتف حول هذه الأبعاد هي الأكثر احتمالاً في التصادم. وستتضمن نصف التصادمات تقريباً تصادم الأوتار/الأوتار المضادة التي تؤدي إلى التلاشي الذي سيؤدي بدوره للإقلال من التقييد مما يسمح لهذه الأبعاد الثلاثة بالاستمرار في التمدد. وكلما زاد التمدد، أصبح من الأصعب أن تلتف حولها أوتار أخرى، حيث أن الأمر يتطلب طاقة أكبر للوتر حتى يلتف حول بعد أطول. وهكذا، يستهلك التمدد نفسه، ليصبح أقل تقييداً كلما زادت الأبعاد طولاً. ويمكننا الآن أن نتخيل أن تلك الأبعاد المكانية الثلاثة تواصل النمو بالطريقة التي وصفناها في المقطع السابق، وتمتد إلى حجم يماثل الكون أو هو أكبر من الكون الذي نشاهده الآن.

تاسعاً: الكوسمولوجيا وأشكال كالابي - ياو

وللتبسيط تصور براندنبرجر وفافا أن كل الأبعاد الفضائية دائرية. وفي الحقيقة وكما أشرنا في الفصل الثامن، طالما كانت الأبعاد الدائرية من الكبر بحيث أنها تنحني على نفسها لتلتقي أطرافها خارج مدى مقدرتنا الحالية على ملاحظة ذلك،

(5) بالنسبة للقارئ ذي الميول الرياضية، نشير إلى أنّ الفكرة وراء هذه النتيجة هي كالآتي: إذا كان مجموع الأبعاد الزمكانية للمسارات التي يمسحها كل من الجسمين تساوي أو أكبر من الأبعاد الزمكانية للساحة التي يتحركان خلالها فإنهما عموماً سيتقاطعان. فعلى سبيل المثال، إذا مسحت جسيمة نقطة مساراً زمكانياً أحادي البعد - فإن مجموع الأبعاد الزمكانية لمساري جسيمتين من هذا النوع هو اثنان. والبعد الزمكاني للأرض الخط هو أيضاً اثنان، ولذلك فإن مساراتهما عموماً ستتقاطع (مفترضين أن سرعتيهما الموجهة لم تتحدد بدقة لتتساويا تماماً). وبالمثل، فالأوتار التي تمسح مسارات زمكانية ثنائية الأبعاد (عالمها الغشاء)، فإن المجموع لوترين موضع الحديث هو أربعة. ويعني هذا أن الأوتار تتحرك في أربعة أبعاد زمكانية (ثلاثة فضائية وواحد زماني) وستتقاطع عموماً.

فالشكل الدائري يتمشى مع الكون الذي نلاحظه. أما بالنسبة للأبعاد التي ظلت صغيرة، فالسيناريو الأكثر واقعية هو ذلك الذي تتجعد فيه هذه الأبعاد في شكل أكثر تعقيداً من أشكال كالابي-ياو. ومن الطبيعي أن يكون السؤال الهام هو: أي أشكال كالابي-ياو؟ وكيف يتحدد الفضاء المعين هذا؟ لم يستطع أحد الإجابة عن هذا السؤال حتى الآن. لكن بربط نتائج التغير الطوبولوجي الحاد التي شرحت في الفصل السابق مع هذه الأفكار الكوسمولوجيا، يمكننا أن نقترح إطاراً لإنجاز ذلك. فنحن نعرف أنه من خلال التحولات المخروطية الممزقة للفضاء يمكن لأي شكل من أشكال كالابي-ياو أن يتحول إلى شكل آخر. وهكذا يمكن أن نتخيل أنه خلال اللحظات المضطربة الساخنة بعد الانفجار الهائل ببرهة، تظل مكونات كالابي-ياو المتجعدة في الفضاء صغيرة لكنها تعاني من اهتزازات عنيفة حيث تتمزق أنسجتها وتعود للالتحام مرات ومرات لتأخذنا بسرعة عبر سلسلة من الأشكال المختلفة لكالابي-ياو. وكلما برد الكون وازدادت الأبعاد الفضائية طولاً يتباطأ معدل تحول أشكال كالابي-ياو بعضها إلى بعض، مع ثبات واستقرار الأبعاد الإضافية في أشكال كالابي-ياو التي تعطي بالتفاؤل السمات الفيزيائية التي نشاهدها في العالم من حولنا. والتحديات التي تواجه الفيزيائيين تتمثل في فهم تطور مكونات كالابي-ياو في الفضاء بالتفصيل حتى يمكن التنبؤ بوجودها الحالي من المبادئ النظرية. وبواسطة مقدرة أشكال كالابي-ياو المكتشفة حديثاً على التحول بسهولة من شكل إلى آخر، فإننا نرى أن موضوع انتقاء أحد أشكال كالابي-ياو من أشكالها العديدة يمكن أن يختزل إلى مشكلة من مشاكل الكوسمولوجيا (علم الكون)[6].

عاشراً: قبل البداية؟

ولافتقاد براندنبرجر وفافا لمعادلات دقيقة في نظرية الأوتار، فإنهما كانا مضطرين للقيام بالعديد من التقريبات والافتراضات في دراستهما الكوسمولوجيا (علم الكون). وكما قال فافا حديثاً:

تلقي أبحاثنا الضوء على الطريقة الجديدة التي بها تسمح لنا نظرية الأوتار

(6) باكتشاف نظرية -M والإقرار بوجود البعد الحادي عشر، بدأ منظرو نظرية الأوتار دراسة وسائل تجعد كل الأبعاد السبعة الفضائية بطريقة تضعها جميعاً على قدم المساواة. وتسمى الخيارات المحتملة لمثل هذه المخروطات سباعية الأبعاد باسم مخروطات "جويس"، نسبة إلى دومينيك جويس من جامعة أكسفورد، الذي يرجع إليه الفضل في إيجاد التقنيات الأولى لتصميمها الرياضي.

بأن نبدأ بالتعامل مع المعضلات الملحة في المنطلق القياسي للكوسمولوجيا. فنحن نرى مثلاً، أن المفهوم الشامل لتفرد أصلي يمكن تجنبه تماماً بواسطة نظرية الأوتار. ولكن لصعوبة القيام بحسابات جديرة بالثقة تماماً، في مثل هذه الحالات القصوى من مفهومنا الحالي لنظرية الأوتار، فإن أبحاثنا تقدم فقط النظرة الأولى على كوسمولوجية الأوتار، وبعيداً تماماً عن أن يكون ذلك هو آخر الكلمات(7).

ومنذ ظهور أبحاثهما - براندنبرجر وفافا - قطع الفيزيائيون شوطاً متقدماً في تعميق فهمهم لكوسمولوجيا الأوتار (علم الكون للأوتار)، الذي ابتدأ بواسطة غابرييل فينزيانو ورفيقه ماوريتسيو غاسبريني من جامعة تورنتو، ضمن آخرين، حيث توصلوا إلى صورة خادعة لكوسمولوجية الأوتار التي تشترك في بعض السمات المعينة مع السيناريو المذكور أعلاه، لكنها تختلف عنها بشكل ملحوظ. وقد اعتمد هذان الفيزيائيان، كما فعل براندنبرجر وفافا، على أن لنظرية الأوتار حداً أدنى من الطول لتجنب درجة الحرارة اللانهائية والطاقة والكثافة التي تظهر في النظرية القياسية والنظرية التضخمية فى الكوسمولوجيا (علم الكون). ولكن، بدلاً من أن يستنتجا أن العالم قد بدأ على شكل شذرة في حجم بلانك في غاية السخونة، فإن غاسبريني وفينيتسيانو قد اقترحا أنه ربما يكون هناك عالم سابق على بداية الكون (Prehistory to the Universe) - كان قد بدأ منذ زمن بعيد قبل اللحظة التي نطلق عليها لحظة الصفر في الزمان - والتي تقودنا إلى الجنين الكوني لبلانك.

وفي هذا السيناريو الذي يطلق عليه ما قبل الانفجار الهائل، بدأ الكون في حالة شديدة الاختلاف عن حالته في إطار الانفجار الهائل. ويقترح غاسبريني وفينيتسيانو في أبحاثهما أن العالم يبدأ أساساً بارداً ولا نهائياً في الفضاء وليس ساخناً بشكل هائل ومجعداً بشدة في قطع فضائية دقيقة. وفي هذه الحالة تشير معادلات نظرية الأوتار إلى أن هذا العالم - إلى حد ما كما في عصر جث التضخمي - قد تعرض لعدم ثبات دافعاً كل نقطة في الكون إلى أن تتباعد بسرعة بعضها عن بعض. ويبين غاسبريني وفينيتسيانو أن ذلك يتسبب في تحدب أكثر للفضاء مما يؤدي إلى زيادة هائلة في درجة الحرارة وطاقة الكثافة(8). وبعد بعض

(7) مقابلة مع كومرون فافا في 12 كانون الثاني/ يناير 1998.

(8) سيلاحظ القارئ ذو الخبرة، أن مناقشاتنا تجري في ما يسمى الإطار الوتري المرجعي، الذي فيه ينشأ التحدب المتزايد أثناء فترة ما قبل الانفجار الهائل من تزايد شدة قوى الجاذبية (مسوقة بالديلاتون A Dilaton-Driven). أما في ما يطلق عليه إطار آينشتاين، فإن التطور يمكن أن يوصف على أنه طور تقلص متسارع.

الوقت ستبدو منطقة ثلاثية الأبعاد في حجم ملليمتر داخل هذا المدى الشاسع مثل كتلة كثيفة فائقة السخونة تماماً منبثقة من تمدد جث التضخمي. وعندئذ ومن خلال التمدد القياسي فى الكوسمولوجيا (علم الكون العادي) المتضمن للانفجار الهائل، يمكن أن تكون هذه الكتلة مسؤولة عن كل الكون المألوف لنا. وفوق ذلك، ولأن عصر ما قبل الانفجار الهائل يتضمن التمدد التضخمي الخاص به، فإن الحل الذي اقترحه جث لمعضلة الأفق يصبح تلقائياً جزءاً من سيناريو الكوسمولوجيا السابقة على الانفجار الهائل. وكما قال فينزيانو: "تقدم نظرية الأوتار لنا صورة من الكوسمولوجيا التضخمية على طبق من الفضة"[9].

وتصبح الدراسات الخاصة بكوسمولوجية الأوتار الفائقة مجالاً خصباً ونشطاً للبحث العلمي. فمثلاً، ولَّد سيناريو ما قبل الانفجار الهائل بالفعل كمًّا هائلاً من الجدل الساخن والمثمر، غير أنه ما زال بعيداً عن الدور الذي يمكن أن يكون له في إطار الكوسمولوجيا التي ستنبثق في النهاية من نظرية الأوتار. والتوصل إلى هذه الأفكار في الكوسمولوجيا سيعتمد بشدة على مقُدرة الفيزيائيين على أن يدركوا كل ما يتعلق بالثورة الثانية للأوتار الفائقة. فما هي مثلاً نواتج الكوسمولوجيا الناشئة عن وجود أغشَية أساسية لها أبعاد أكثر؟ كيف تتغير الخواص الواردة في الكوسمولوجيا، التي ناقشناها، إذا كان لنظرية الأوتار ثابت ازدواج قيمته تضعنا في مكان أقرب إلى مركز الشكل رقم (12–11) بدلاً من وجودنا في إحدى أشباه الجزر؟ أي ما هو تأثير الصورة الكاملة لنظرية-M في اللحظات المبكرة الأولى للكون؟ وتجري الآن دراسات محمومة على هذه التساؤلات المحورية. وبالفعل ظهرت بصيرة ثاقبة هامة في هذا الصدد.

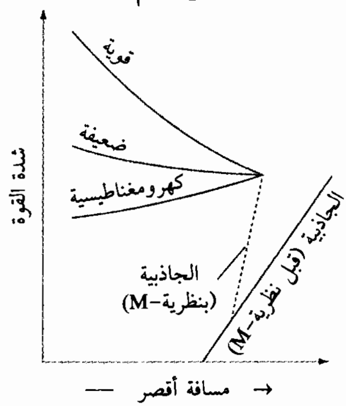
حادي عشر: نظرية-M واندماج كل القوى

بيّنا في الشكل رقم (7–1) كيف تندمج شدة القوى اللاجاذبية معاً عندما ترتفع درجة حرارة الكون بما فيه الكفاية، وكيف تتواءم شدة قوى الجاذبية داخل هذه الصورة. فقبل ظهور نظرية-M كان في مقدور منظري نظرية الأوتار أن يبينوا أنه باستخدام أبسط الخيارات من أشكال كالابي-ياو في الفضاء تندمج قوى الجاذبية على الأغلب وليس تماماً مع القوى الثلاث الأخرى، كما هو موضح في الشكل رقم (14–2). وقد وجد منظرو نظرية الأوتار أنه يمكن تجنب عدم التوافق هذا وذلك بصياغة أشكال كالابي-ياو المختارة بعناية شديدة ضمن حيل أخرى،

(9) مقابلة مع غابرييل فينزيانو في 19 أيار/ مايو 1998.

ولكن كما هو معهود فإن التدقيق الشديد بعد الصياغة يسبب عدم ارتياح للفيزيائيين. وحيث أنه لا يوجد حالياً من يستطيع التنبؤ بالشكل الدقيق لأبعاد كالابي-ياو، فإن الأمر يبدو من الخطورة أن نعتمد على حلول للمشكلات التي تتعلق بوهن بالتفاصيل الدقيقة لأشكال كالابي-ياو.

الشكل رقم (2-14)



يمكن أن تندمج شدة كل القوى الأربع بشكل طبيعي في إطار نظرية-M.

ومع ذلك، فإن ويتن قد بَيَّن أن الثورة الثانية للأوتار الفائقة قد قدمت حلاً أكثر تأثيراً بكثير. وقد وجد ويتين - بواسطة دراسة الكيفية التي تتغير بها شدة القوى عندما لا يكون ثابت ازدواج الأوتار صغيراً بالضرورة - أن تحدب قوى الجاذبية يمكن أن يُدفع برفق للاندماج مع القوى الأخرى كما في الشكل رقم (2-14) من دون قولبة خاصة لأجزاء كالابي-ياو من الفراغ. ومع أن الأمر ما زال مبكراً جداً، فربما يشير ذلك إلى أنه يمكن التوصل إلى وحدة الكوسمولوجيا بسهولة أكثر باستغلال الإطار الأكبر لنظرية-M.

تمثل التطورات التي ناقشناها في هذا المقطع والمقاطع السابقة إلى حد ما أولى الخطوات المعنية بفهم الاستخدامات الكوسولوجية لنظرية الأوتار/ -M. وخلال السنوات القادمة، وأثناء تنقيح الأدوات الاضطرابية لنظرية الأوتار/ -M فإن الفيزيائيين يتوقعون أن تنبثق بعض أعظم وأهم الأفكار من تطبيقات هذه الأدوات في حل تساؤلات الكوسمولوجيا.

وبدون امتلاك وسائل لها القدرة الكافية للفهم التام للكوسمولوجيا وفقاً لنظرية الأوتار حالياً، فمن الجدير أن نفكر في بعض الاعتبارات العامة المتعلقة

بالدور المحتمل للكوسمولوجية أثناء بحثنا عن النظرية النهائية. وإننا نحذر بأن بعض هذه الأفكار ذات طبيعة تخمينية أكثر من الأفكار التي نوقشت من قبل، لكنها تثير بالفعل الموضوعات التي قد تتعرض لها أية نظرية نهائية متوقعة.

ثاني عشر: التخمينات الكوسمولوجيا والنظرية النهائية

للكوسمولوجية المقدرة على الإمساك بنا بشدة عند مستوى عميق ودقيق، لأنه إذا فهمنا كيف بدأت الأشياء فإن ذلك يشبه شعورنا بالاقتراب أكثر من أي وقت مضى من فهم لماذا حدثت بداية الأشياء، على الأقل للبعض منا. ولا يعني ذلك أن العلم الحديث يقدم ارتباطاً بين السؤال كيف والسؤال لماذا - وهو لا يفعل ذلك - وربما لن توجد أية علاقة علمية أبداً بينهما. غير أن دراسة الكوسمولوجيا تعد بإعطائنا فهما تاماً إلى أبعد ما يمكن لساحة السؤال لماذا - أي لماذا ميلاد الكون - ويسمح ذلك على الأقل بنظرية مزودة بالمعرفة العلمية للإطار الذي تصاغ فيه الأسئلة. وفي بعض الأحيان يكون الوصول إلى التآلف العميق مع السؤال هو أحسن تعويض فعلي من الإجابة.

وفي سياق البحث عن النظرية النهائية، فإن هذه الانعكاسات القيمة على الكوسمولوجيا تفسح الطريق نحو اعتبارات أكثر صلابة بكثير. والطريقة التي تبدو لنا بها الأشياء اليوم - الطريقة الموجودة في أقصى يمين خط الزمن في الشكل رقم (14-1) - تعتمد على القوانين الأساسية للفيزياء، ولتكن متأكداً، إنها قد تعتمد كذلك على خصائص تطور الكوسمولوجيا من أقصى يسار خط الزمن، والتي يحتمل أن تقع خارج نطاق حتى أكثر النظريات عمقاً.

وليس من الصعب تخيل كيف يمكن أن يكون ذلك. ولتفكر في ما يحدث مثلاً عندما تقذف بكرة في الهواء. فستتحكم قوانين الجاذبية في حركة الكرة، لكننا لا يمكن أن نتنبأ بموقع استقرار الكرة تماماً انطلاقاً من هذه القوانين. فلا بد لنا أن نعرف سرعة الكرة - السرعة والاتجاه - في لحظة خروجها من يدك. أي أننا يجب أن نعرف "الظروف الأصلية" لحركة الكرة. وبالمثل فإن هناك سمات للكون لها كذلك احتمالات تاريخية - ويعتمد السبب في تكوين نجم في مكان ما وكوكب في مكان آخر على سلسلة معقدة من الأحداث التي، على الأقل من حيث المبدأ، يمكن أن نتخيل اقتفاء أثرها حتى نصل إلى بعض السمات عن الكيفية التي كان عليها الكون عندما بدأ كل ذلك. غير أنه من المحتمل أنه حتى السمات الأساسية للكون، وربما حتى الخواص الأساسية للمادة وجسيمات القوى، تعتمد مباشرة على التطور التاريخي - التطور الذي يتوقف هو نفسه على

الظروف الأصلية للكون.

وفي الحقيقة لقد لاحظنا بالفعل تجسيداً محتملاً لهذه الفكرة في نظرية الأوتار: عندما تطور الكون الساخن المبكر، ربما تكون الأبعاد الإضافية قد تحولت من شكل إلى آخر، لتستقر في النهاية عندما يبرد الكون بما فيه الكفاية في أحد أشكال كالابي-ياو. ومثل الكرة التي قذفت في الهواء، فإن نتيجة الرحلة من خلال العديد من أشكال كالابي-ياو قد تعتمد على تفاصيل كيفية بداية الرحلة في المقام الأول. ومن خلال تأثير أشكال كالابي-ياو الناتجة في كتلة الجسيمات وخواص القوى، فإننا نرى أن التطور الكوسمولوجي وحالة الكون عند البداية يمكن أن يكون لهما وقع مدوٍّ على الفيزياء التي نعرفها حالياً.

ونحن لا نعرف ماهية الظروف الأولى للكون، ولا حتى الأفكار والمفاهيم واللغة التي يجب استخدامها لوصف تلك الظروف. ونحن نعتقد أن الحالة الأصلية القصوى للطاقة، والكثافة ودرجة الحرارة اللانهائية التي تظهر في النموذجين الكوسمولوجيين القياسي والتضخمي، ما هي إلا إشارة إلى أن هاتين النظريتين قد انهارتا بدلاً من أن تصبحا وصفاً صحيحاً للظروف الفيزيائية الموجودة فعلاً. تقدم نظرية الأوتار تصحيحاً لذلك بأن تبين كيفية تجنب مثل هذه الحالات اللانهائية القصوى، ومع ذلك فلا يملك أحد أية فكرة للإجابة عن السؤال عن بداية تلك الأحداث. وفي الحقيقة فإن جهلنا يتأكد حتى مستويات أعلى: فنحن لا نعرف ما إذا كان السؤال عن تحديد الظروف الأصلية سؤالاً ذا مغزى، أم أن هذا السؤال يقع بعيداً تماماً عن متناول أية نظرية إلى الأبد، كما في حالة توجهنا بالسؤال إلى النسبية العامة للإجابة عن مدى قوة قذف الكرة في الهواء. قام الفيزيائيون من أمثال هوكنغ وجيمس هارتل من جامعة كاليفورنيا في سانتا باربارا بمحاولات شجاعة لإخضاع السؤال حول الظروف الأصلية الكوسمولوجيا تحت مظلة نظريات الفيزياء، إلا أن هذه المحاولات ظلت بلا نتائج نهائية. وفي سياق نظرية الأوتار/M- فإن فهمنا الكوسمولوجي حالياً ما زال بدائياً جداً ليتمكن من تحديد ما إذا كانت نظريتنا المرشحة لتكون "نظرية كل شيء" ترقى لاسمها حقيقة، وأنها تحدد ظروفها الأصلية الكوسمولوجيا، وبذلك تسمو بها إلى مرتبة قوانين الفيزياء. وهو سؤال أساسي للأبحاث المستقبلية.

ولكن حتى في ما عدا موضوع الظروف الأصلية ووقعها على التتبع التاريخي للتطورات الكونية، فإن بعض المقترحات الحديثة عالية الافتراضية قد قدمت حدوداً محتملة أخرى للمقدرة التفسيرية لأية نظرية نهائية. ولا يعرف أحد ما إذا كانت هذه الأفكار صحيحة أم خاطئة، غير أنه من المؤكد أنها تقع على حدود

التيار الرئيسي للعلم. لكنها تلقي بالضوء فعلاً - إن لم يكن بطريقة مستفزة وافتراضية - على أي عائق قد تقابله النظرية النهائية.

وتعتمد الفكرة الأساسية على الاحتمال التالي. تخيل أن ما نسميه الكون هو في الواقع جزء ضئيل فقط من مدى كوسمولوجي فسيح وشاسع، وواحد من عدد هائل من الجزر الكونية المنتشرة عبر أرخبيل كوسمولوجي عظيم. ومع أن ذلك قد يبدو شيئاً غير معقول، وربما يكون كذلك في النهاية، إلا أن أندريه ليند اقترح آلية مُحكمة قد تؤدي إلى مثل هذا الكون العملاق. وقد وجد ليند أن التمدد التضخمي الموجز لكنه محوري، الذي ناقشناه في الفصل السابق، قد لا يكون متفرداً، يحدث لمرة واحدة. وبدلاً من ذلك فإنه يدفع بأن ظروف التمدد التضخمي قد تكررت مرات ومرات في مناطق منعزلة منتشرة في الكون، تمر بدورها بتمدد تضخمي كالبالون، الذي يتطور إلى عوالم جديدة منفصلة. وفي كل واحد من هذه العوالم تتواصل عملية التمدد التضخمي حيث تنشأ عوالم أخرى من الأطراف البعيدة للشبكة الكونية اللانهائية للمدى الكوني. وتصبح المصطلحات أكثر تعقيداً، ولكن لنتبع العصر ونطلق هذا المفهوم حول التمدد الهائل باسم "الكون المتعدد أو العالم المتعدد" (Multiverse) بحيث يكون كل جزء من مكوناته عالماً (Universe).

والملاحظة الرئيسية هي أنه بينما كنا قد أشرنا في الفصل السابع إلى أن كل شيء نعرفه يشير إلى فيزياء متجانسة ومتماسكة خلال عالمنا، وقد لا يكون لذلك علاقة بالمتطلبات الفيزيائية في تلك العوالم الأخرى، طالما أنها منفصلة عنا، أو على الأقل أنها بعيدة كل البعد عنا للدرجة التي لا يملك فيها الضوء الزمن الكافي للوصول إلينا. وهكذا من الممكن أن نتخيل أن الفيزياء تختلف من عالم لآخر. وقد يكون الاختلاف دقيقاً في بعض هذه العوالم: فمثلاً قد تكون كتلة الإلكترون أو شدة القوى القوية أكبر أو أصغر بمقدار جزء من الألف بالمائة عما هي عليه في عالمنا. وفي البعض الآخر قد تختلف الفيزياء بشكل أكثر حدة: فقد يزن الكوارك الأعلى عشرة أضعاف ما يزنه في عالمنا أو تكون شدة القوى الكهرومغناطيسية عشرة أضعاف قيمتها التي نقيسها في عالمنا، مع كل ما يتبع ذلك من مظاهر وتطبيقات على النجوم وعلى الحياة كما نعرفها (كما أشرنا في الفصل الأول). وقد تختلف الفيزياء في العوالم الأخرى بشكل أكثر راديكالية: فقد تكون قائمة الجسيمات الأولية والقوى مختلفة تماماً عن عالمنا، أو إذا استعرنا لمحة من نظرية الأوتار، فقد يكون عدد الأبعاد الممتدة مختلفاً مع وجود بعض العوالم المنضبطة ذات أبعاد فضائية قليلة أو حتى قد تصل إلى الصفر أو يكون لها بعد

واحد كبير، بينما هناك عوالم أخرى قد يكون لها ثمانية أو تسعة أو حتى عشرة أبعاد فضائية ممتدة. وإذا أطلقنا العنان لخيالنا فحتى القوانين نفسها قد تتغير بشدة من عالم لآخر. فمدى الاحتمالات هنا بلا نهاية.

والمهم هنا هو أنه إذا استعرضنا هذه المتاهات الهائلة من العوالم، فإن الغالبية العظمى منها لن تكون ظروفها مواتية للحياة أو لأي شيء يمت بصلة ولو بعيدة للحياة التي نعرفها. وفي ما يتعلق بالتغيرات الحادة في الفيزياء المألوفة فإن هذا الأمر واضح: فإذا كان عالمنا في الواقع يشبه عالم خرطوم المياه، فإن الحياة التي نعرفها لن تكون موجودة. فحتى مجرد التغيير البسيط في الفيزياء سيؤثر في تكوين النجوم مثلاً، مما يحيد بمقدرتها على أن تعمل كأفران كونية لإنتاج الذرات الداعمة للحياة مثل الكربون والأوكسجين، اللذين عادة ما ينتشران خلال الكون بواسطة انفجارات المستعرات العظمى. وفي ضوء حساسية اعتماد الحياة على تفاصيل الفيزياء، إذا سألنا مثلاً لماذا كانت القوى والجسيمات في الطبيعة لها الخواص المعينة التي نعرفها، فمن الممكن أن تنتج الإجابة المحتملة الآتية: تختلف هذه السمات اختلافاً بيّناً عبر كل العوالم المتعددة (Multiverses)؛ فمن الممكن أن تكون خواصها مختلفة وهي بالفعل مختلفة في العوالم الأخرى. والشيء المميز عن اتحاد الجسيمات وخواص القوى التي نألفها هي أنها تسمح للحياة بأن تنشأ. ولا بد من أن تكون الحياة، والحياة الذكية على وجه الخصوص، شرطاً مسبقاً لإثارة التساؤل لماذا لكوننا الخواص المعروفة. وبلغة مباشرة فإن الأشياء على ما هي عليه في كوننا، لأنه لو لم تكن كذلك فلن نكون موجودين لنلاحظ ذلك. ومثل الرابحين في لعبة الروليت الروسي الجماعية، الذين يهدأ ذهولهم بإدراكهم أنه إذا لم يكونوا قد ربحوا، فإنهم لن يكونوا هناك ليشعروا بالذهول، فإن فرضية العوالم المتعددة لها المقدرة على التقليل من إصرارنا على شرح سبب ظهور كوننا على ما هو عليه.

وهذا النوع من الجدل صورة من فكرة لها تاريخ طويل معروف باسم المبدأ البشري (Anthropic Principle). وكما هو معروض هنا، فإن هذا المنظور يقف على نقيض الحلم بنظرية قوية تامة المقدرة على التنبؤ وموحدة حيث تتواجد بها كل الأشياء على الحالة التي هي عليها لأن الكون لا يمكن أن يكون إلا كذلك. وبدلاً من أن يكون العالم المتعدد مثالاً شاعرياً تتواجد فيه كل الأشياء في مكانها معاً بأناقة صارمة، فإن هذا العالم المتعدد والمبدأ البشري يرسمان صورة لمجموعة عريضة من العوالم التي لا يشبع نهمها للتغير. وسيكون الأمر في غاية الصعوبة إن لم يكن مستحيلاً أن نعرف ما إذا كانت صورة العالم المتعدد صحيحة

أم لا. فحتى لو كانت هناك عوالم أخرى، فإننا يمكن أن نتخيل أننا لن نتمكن أبداً من الاتصال بأي منها. غير أنه بزيادة مجال "ما الذي يوجد في الخارج هناك" - الأمر الذي يقزّم نتائج هابل عن أن درب اللبانة ليس إلا مجرة واحدة من العديد من المجرات - فإن مفهوم العالم المتعدد يحذرنا على الأقل بأن هناك احتمالاً أننا نتخطى حدودنا بالتطلع إلى نظرية نهائية.

ولا بد أن نتطلب في النظرية النهائية وصفاً متماسكاً لجميع القوى وكل المادة في إطار ميكانيكا الكم. كما لا بد أن نتطلب من النظرية النهائية أن تعطي كوسمولوجية مقنعة داخل عالمنا. غير أنّه إذا كانت صورة العالم المتعدد صحيحة - وهو افتراض بعيد الاحتمال - فإننا نطلب الكثير من نظريتنا لتشرح كذلك الخواص التفصيلية لكتلة قوة الجسيمات وشحنتها وشدتها.

غير أنه لا بد من أن نؤكد على أنه حتى لو تقبلنا فرضية العالم المتعدد، فإن استنتاجنا الذي يهادن مقدرتنا التنبئية بعيد عن أن يكون خالياً من العيوب. وببساطة فإن السبب هو أنه إذا أطلقنا لأنفسنا العنان في التخيل، وسمحنا لأنفسنا أن نتصور وجود العالم المتعدد، فعلينا أيضاً أن نطلق العنان لمعتقداتنا النظرية ونفكر في الطرق التي يمكن أن تروض من العشوائية الظاهرية نسبياً للعالم المتعدد. وبالتأمل المتحفظ نسبياً، يمكن أن نتخيل - إذا كانت صورة العالم المتعدد صحيحة - أننا قادرون على مد نظريتنا النهائية إلى آخر مدى تصل إليه، وأن "نظريتنا النهائية الممتدة" قد تنبئنا بالضبط لماذا وكيف تبعثرت قيم المؤشرات الأساسية عبر مكونات العوالم.

وقد جاءت أكثر الأفكار راديكالية من اقتراح لي سمولين من جامعة ولاية بنسلفانيا، الذي استلهم ذلك من التشابه بين ظروف الانفجار الهائل ومراكز الثقوب السوداء - يتميز كل منهما بكثافة هائلة للمادة المسحوقة - فاقترح أن كل ثقب أسود ما هو إلا نواة لعالم جديد يخرج للوجود من خلال انفجار هائل، لكنه محتجب إلى الأبد عن أنظارنا بواسطة أفق حدث الثقب الأسود. وبجانب اقتراح سمولين لآلية أخرى من آليات توليد العالم المتعدد، فإنه قد أدخل عنصراً جديداً - صورة كونية من التطفر الجيني - وضع النهاية حول التقييد العلمي المرتبط بالمبدأ البشري[10]. وقد اقترح أنه لو تصورت عالماً يتبرعم من لب ثقب أسود، فإن خواصه الفيزيائية، مثل كتلة الجسيمات وشدة القوى، ستكون قريبة

(10) نوقشت أفكار سمولين في كتابه: Lee Smolin, *The Life of the Cosmos* (New York: Oxford University Press, 1997).

لكنها ليست تماماً مثل تلك الموجودة في العالم الذي جاء منه. وحيث أن الثقوب السوداء تنشأ عن النجوم المستهلكة، وأن تكوين النجوم يعتمد على القيم الدقيقة لكتلة الجسيمات وشدة شحنتها، فإن خصوبة أي عالم - أي عدد الثقوب السوداء الوليدة التي يمكن أن ينتجها - تعتمد بحساسية على هذه المؤشرات. وستؤدي التغيرات الطفيفة في مؤشرات العوالم الوليدة بذلك إلى بعض العوالم الأخرى التي تصبح أكثر مواءمة لإنتاج الثقوب السوداء أكثر من العالم الذي جاءت منه، وستعطي عدداً أكبر من العوالم الوليدة الخاصة بها[11]. وبعد أجيال كثيرة، ستصبح أحفاد العوالم أكثر مواءمة لإنتاج الثقوب السوداء التي ستصبح من الكثرة بحيث تطغى على قاطني العالم المتعدد. وهكذا، وبدلاً من الاستدلال بالمبدأ البشري، فإن اقتراح سمولين يقدم آلية ديناميكية تؤدي في المتوسط بمؤشرات كل جيل تال من العوالم للاقتراب أكثر فأكثر من قيم معينة - القيم الموائمة لإنتاج الثقوب السوداء.

ويقدم هذا المنطلق طريقة أخرى بها يمكن تفسير المادة الأساسية ومؤشرات القوى، حتى في إطار العالم المتعدد. فإذا كانت نظرية سمولين صحيحة، وكنا نحن عضوا نموذجياً ناضجاً في عالم متعدد (وهذا افتراض خيالي جداً ويمكن دحضه من جهات عديدة بالطبع)، فإن مؤشرات الجسيمات والقوى التي نقيسها لا بد أن تتواءم لإنتاج الثقوب السوداء. ويعني ذلك أن أي عبث في هذه المؤشرات الخاصة بعالمنا لا بد من أن يجعل تكوين الثقوب السوداء أمراً أكثر صعوبة. وقد بدأ الفيزيائيون في دراسة هذه المقترحات، ولكن حتى الآن ليس هناك ما يؤكد صحتها. غير أنه حتى لو اتضح أن مقترح سمولين غير صحيح، فإنه ما زال يقدم طريقا آخر يمكن أن تتخذه النظرية النهائية. ولأول وهلة قد يبدو أن النظرية النهائية تفتقد التماسك. فقد نجد أنها تصف عدداً كبيراً من العوالم، الكثير فيها ليس له علاقة بالعالم الذي نعيش فيه. والأكثر من ذلك، يمكننا أن نتخيل أن هذه الكثرة من العوالم ربما يمكن إدراكها فيزيائياً، الأمر الذي يؤدي إلى عالم متعدد - الأمر الذي يؤدي لأول وهلة إلى تحديد مقدرتنا على التنبؤ للأبد. ومع ذلك ففي

(11) في إطار نظرية الأوتار مثلاً، يمكن إرجاع هذا التطور إلى تغيرات صغيرة في شكل الأبعاد المتجعدة من أحد العوالم إلى ذريته. ومن نتائجنا المتعلقة بالتحولات المخروطية الممزقة للفضاء فإننا نعلم أن تسلسلاً طويلاً بما فيه الكفاية من مثل هذه التغيرات الصغيرة يمكن أن يأخذنا من أحد أشكال كالابي-ياو إلى شكل آخر، سامحاً بذلك للعالم المتعدد بأن يحظى بكفاءة تكاثر لكل العوالم القائمة على الأوتار. وبعد أن يكون العالم المتعدد قد مر خلال مراحل عديدة بما يكفي من التكاثر، فإن فرضية سمولين قد تؤدي بنا إلى توقع أن يكون للكون النمطي مكون من كالابي-ياو مهيأ للإخصاب.

الحقيقة تصور هذه المناقشة أن التفسير النهائي يمكن على أية حال التوصل إليه طالما أدركنا أنه ليس فقط مجرد الوصول إلى القوانين النهائية، ولكن أيضاً تطبيقاتها على التطور الكوسمولوجي في مدى عظيم بشكل غير متوقع، يمثل نهاية المطاف.

وبلا شك فإن التطبيقات الكوسمولوجية لنظرية الأوتار/ -M ستكون مجالاً للدراسة في القرن الحادي والعشرين. وبدون معجلات قادرة على إنتاج طاقة بقيمة طاقة بلانك، سيزداد اعتمادنا على معجل الانفجار الهائل الكوسمولوجي، والبقايا التي تخلفت في جميع أنحاء الكون، وذلك للحصول على بيانات تجريبية. وبشيء من الحظ والمثابرة قد نتمكن في النهاية من الإجابة عن بعض الأسئلة مثل كيف بدأ الكون، ولماذا تطور إلى الشكل الذي نراه في السماء وعلى الأرض. وهناك بالطبع مناطق مجهولة بين ما نعرفه وموقع الإجابات الكاملة عن هذه الأسئلة الأساسية. غير أن تطوير نظرية كمية للجاذبية من خلال نظرية الأوتار الفائقة يدعم الأمل في أننا الآن نمتلك الأدوات النظرية لاقتحام المناطق الشاسعة من المجهول، وبلا شك فإننا سنحصل بعد نضال طويل على إجابات لأكثر الأسئلة عمقاً.

القسم الخامس

التوحيد في القرن الحادي والعشرين

الفصل الخامس عشر

آفاق مستقبلية

بعد قرون من الآن، ربما تكون نظرية الأوتار الفائقة، أو ما تطور منها في إطار نظرية-M، قد تطورت أبعد كثيراً من صياغتنا الحالية وللدرجة التي يمكن ألا يتعرف عليها أفضل رواد البحث العلمي اليوم. وبمواصلة بحثنا عن النظرية النهائية، فإننا قد نجد أن نظرية الأوتار ليست إلا واحدة من الخطوات الأساسية على الطريق نحو المفهوم الأعظم للكون - المفهوم الذي يتضمن أفكاراً تختلف جذرياً عن أي شيء تعاملنا معه في السابق. ويعلمنا تاريخ العلوم أنه في كل مرة نتصور أننا قد توصلنا إلى الفهم الكامل تفاجئنا الطبيعة بشكل جذري بما في جعبتها لنا مما يتطلب تغيرات أحياناً حادة وجوهرية في فهمنا لطريقة عمل الكون. ومرة ثانية، وفي لمحة من التأمل يمكن أن نتصور أيضاً، كما فعل السابقون من قبل وربما بسذاجة، أننا نعيش في فترة هامة في تاريخ البشرية، حيث فيها ستصبح القوانين النهائية للكون أخيراً في متناول أيدينا، وكما قال إدوارد ويتن:

> إنني أشعر أننا قريبون جداً من نظرية الأوتار - في أعظم لحظات تفاؤلي - وأتصور أنه يوماً ما، سيسقط الشكل النهائي للنظرية من السماء ليهبط في حجر شخص ما. لكن وبشكل أكثر واقعية فإنني أشعر أننا الآن في سياق عملية بناء نظرية أكثر عمقاً من أي شيء قمنا به من قبل، وربما أيضاً في القرن الواحد والعشرين، عندما سأكون من الكبر للدرجة التي لن أستطيع معها تقديم أية أفكار ذات قيمة في هذا الموضوع. وعلى الفيزيائيين الشبان أن يقرروا ما إذا كنا فعلاً قد توصلنا إلى النظرية النهائية[1].

ومع أننا ما زلنا نشعر بتوابع الثورة الثانية للأوتار الفائقة، وأننا نستوعب الأفكار الجديدة التي تولدت عن ذلك، فإن معظم منظري نظرية الأوتار يتفقون على أنه من المحتمل أن الأمر قد يستغرق ثورة نظرية ثالثة وربما رابعة قبل أن تنكشف المقدرة الكاملة لنظرية الأوتار ودورها المحتمل كما تقيمها النظرية النهائية. وكما رأينا، فإن نظرية الأوتار قد شكلت بالفعل صورة جديدة جديرة

---

(1) مقابلة مع إدوارد ويتن في 4 آذار/ مارس 1998.

بالملاحظة لكيفية عمل الكون، لكن ما زال هناك معوقات ونهايات غير محبوكة ستكون بلا شك الموضوع المركزي لمنظري نظرية الأوتار خلال القرن الواحد والعشرين. وهكذا، ففي هذا الفصل الأخير لن نتمكن من وضع نهاية الرواية البشرية في بحثها عن أعمق قوانين الكون، لأن البحث ما زال متصلاً. وبدلاً من ذلك، لنوجه أبصارنا إلى مستقبل نظرية الأوتار، وذلك بمناقشة خمسة أسئلة محورية سيواجهها منظرو نظرية الأوتار عند مواصلتهم تعقب النظرية النهائية.

أولاً: ما هو المبدأ الأساسي في نظرية الأوتار؟

إن الدرس الكبير الذي تعلمناه خلال المائة عام الماضية هو أن القوانين المعروفة في الفيزياء تصاحبها مبادئ التناظر. فالنسبية الخاصة تقوم على التناظر الكامن في مبدأ النسبية - التناظر بين النقاط التفاضلية ذات السرعة الثابتة. أما قوى الجاذبية كما هي متضمنة في نظرية النسبية العامة فتقوم على مبدأ التكافؤ - امتداد مبدأ النسبية ليضم كل النقاط التفاضلية الممكنة بصرف النظر عن درجة تعقيد حالة حركتها. كما تقوم القوى القوية والضعيفة والكهرومغناطيسية على مبادئ التناظر القياسية الأكثر تجريداً.

ويميل الفيزيائيون، كما ناقشنا من قبل، إلى السمو بمبادئ التناظر بوضعها في موقع مميز في وسط تفسير الأمور. ومن هذا المنظور فإن الجاذبية موجودة لكي تكون كل النقاط التفاضلية الممكنة التي نشاهدها على قدم المساواة تماماً - حتى يصبح مبدأ التكافؤ صحيحاً. وبالمثل، فإن القوى اللاجاذبية موجودة من أجل أن تحترم الطبيعة تناظراتها القياسية المصاحبة لها. ومن الطبيعي أن يحول هذا المنطلق السؤال من لماذا توجد قوى معينة، إلى لماذا تحترم الطبيعة مبدأ التناظر المرافق لها. لكن ذلك يبدو بالتأكيد وكأنه تقدُّم، وخاصة عندما يبدو التناظر موضع السؤال طبيعياً بشكل جلي. فمثلاً، لماذا نتعامل مع إطار مرجعي لمشاهد معين بصورة مختلفة عن إطار آخر؟ ويبدو الأمر أكثر منطقية أن تعامل كل قوانين الكون جميع النقاط التفاضلية التي نشاهدها بالتساوي؛ وهو ما يتم من خلال مبدأ التكافؤ وإدخال الجاذبية في بنية الكون. وعلى الرغم من أن الأمر يتطلب خلفية رياضية معينة لنتقبله تماماً، كما أشرنا في الفصل الخامس، فإن هناك منطقاً مماثلاً وراء التناظرات القياسية التي تقوم عليها القوى اللاجاذبية الثلاث.

وتأخذنا نظرية الأوتار خطوة أخرى على درج أعماق التفسير لأن كل مبادئ التناظر تلك، وكذلك التناظر الفائق الآخر، تنبثق من بنيتها. وفي الحقيقة، لو أن

التاريخ اتخذ مساراً آخر - وتمكن الفيزيائيون من التوصل إلى نظرية الأوتار منذ عدة قرون - فمن الممكن أن نتصور أن مبادئ التناظر تلك كانت ستكتشف جميعها عن طريق دراسة خواصها. غير أنه لو أخذنا في الاعتبار أنه بينما يقدم لنا مبدأ التكافؤ بعض الفهم عن سبب وجود الجاذبية، وأن التناظر القياسي يعطينا إيماءات عن سبب وجود القوى اللاجاذبية، فإن هذه التناظرات تكون في نظرية الأوتار "نتيجة لها". وعلى الرغم من أن أهمية هذه التناظرات لا تقل بأي شكل من الأشكال، إلا أنها تعتبر جزءاً من النتيجة النهائية لبنية نظرية أعظم كثيراً.

وتقود هذه المناقشة إلى السؤال التالي: هل نظرية الأوتار نفسها نتيجة حتمية لبعض المبادئ الأكثر عمومية - ولكنها ليست بالضرورة مبدأ للتناظر - بنفس الطريقة تقريباً التي يؤدي بها مبدأ التكافؤ إلى النسبية العامة بإصرار، أو كما يفضي التناظر القياسي إلى القوى اللاجاذبية؟ وحتى كتابة هذا الكتاب لم يتمكن أحد من أن يدلي بأي شيء مفيد للإجابة عن هذا السؤال. وحتى ندرك أهميته، نحتاج فقط إلى أن نتصور آينشتاين وهو يحاول صياغة النسبية العامة بدون أن تكون لديه الأفكار السعيدة التي حصل عليها في مكتب برن للاختراعات عام 1907، والتي أوصلته إلى مبدأ التكافؤ. فلم يكن من المستحيل أن يقوم بصياغة النسبية العامة من دون أن تكون لديه هذه البصيرة النافذة الأساسية، لكن الأمر كان سيصبح في غاية الصعوبة بكل تأكيد. ويمدنا مبدأ التكافؤ بإطار تنظيمي محكم ومنهجي وذي مقدرة عالية لتحليل قوى الجاذبية. فوصفنا للنسبية العامة في الفصل الثالث يعتمد بشكل أساسي، مثلاً، على مبدأ التناظر، أما دوره في الصياغة الرياضية الكاملة للنظرية فهو أكثر أهمية.

وحالياً، فإن منظري نظرية الأوتار في وضع مشابه لوضع آينشتاين بدون مبدأ التكافؤ. ومنذ الأفكار الثاقبة لفينزيانو عام 1968، أخذت النظرية تتخذ شكلها شيئاً فشيئاً بالاكتشافات المتتالية وبثورة بعد ثورة. لكن ما زال المبدأ المحوري المنظم الذي يضم هذه الاكتشافات وكل السمات الأخرى للنظرية في إطار واحد شامل ومنهجي - الإطار الذي يجعل وجود كل المكونات المفردة حتمياً بصورة مطلقة - ما زال مفقوداً. وسيكون اكتشاف هذا المبدأ لحظة هامة في مسيرة تطور نظرية الأوتار، كما أنه سيكشف جوهر النظرية وطريقة عملها بوضوح غير متوقع. ومن الطبيعي أنه لا يوجد ضمان لوجود مثل هذا المبدأ، لكن تطور الفيزياء خلال المائة عام الماضية يشجع منظري نظرية الأوتار على أن يكون لديهم عظيم الأمل في وجوده. وعندما ننظر إلى الخطوة التالية في تطور نظرية الأوتار نجد أن "مبدأ الحتمية" (Principal of Inevitability) الخاص بها - الذي يكمن وراء الفكرة التي

نبعت منها النظرية ككل بالضرورة - له الأولوية العظمى[(2)].

ثانياً: ما هو المكان والزمان في الواقع، وهل من الممكن العمل بدونهما؟

في كثير من الفصول السابقة استخدمنا مفاهيم الزمان والمكان بحرية. ففي الفصل الثاني وضعنا تيقُّن آينشتاين من أن الزمان والمكان منسوجان في نسيج واحد لا فكاك منه بواسطة الحقيقة غير المتوقعة عن أن حركة الجسم خلال المكان تؤثر في مساره خلال الزمان. أما في الفصل الثالث فقد عمَّقنا فهمنا لدور الزمكان في الكشف عن الكون من خلال النسبية العامة، والتي تبين أن الشكل التفصيلي لنسيج الزمكان ينقل قوى الجاذبية من مكان لآخر. وقد أسست الاضطرابات الكمية العنيفة في البنية المجهرية للنسيج، كما شرحنا في الفصلين الثالث والرابع، الحاجة إلى نظرية جديدة، الأمر الذي أدى إلى نظرية الأوتار. وأخيراً، وفي عدد من الفصول التي تلت ذلك، رأينا أن نظرية الأوتار تنص على

(2) يرى بعض النظريين أن هناك إشارة إلى هذه الفكرة في "Holographic Principle" مبدأ التجسيم، وهو مفهوم أوجده أصلاً ساسكيند والفيزيائي الهولندي المتميز جرارد ت. هوفت. وتماماً مثلما يولِّد الهولوغرام صورة مرئية ثلاثية الأبعاد من شريط ثنائي الأبعاد مصمم خصيصاً لذلك، فإن ساسكيند وت. هوفت قد اقترحا أن كل الأحداث الفيزيائية التي نتعرض لها قد تكون بالفعل مشفرة كلية في معادلات معرّفة في عالم ذي أبعاد أقل. وبالرغم من أن هذا قد يبدو غريباً مثل محاولة رسم صورة لشخص ما بالنظر إلى ظله فقط، فإننا قد ندرك ما يعنيه ذلك، ونفهم جزءاً من دافع ساسكيند وت. هوفت، وذلك بإمعان الفكر في أنتروبية الثقوب السوداء كما جاءت في الفصل 13. ولنسترجع أن أنتروبية الثقوب السوداء تتحدد "بمساحة سطح" أفق حدثها - وليس بالحجم الكلي للفضاء الذي يحده أفق الحدث. ولذلك فإن عدم الترتيب في الثقب الأسود، وبالتالي المعلومات المقابلة التي يحتويها، مشفرة في بيانات ثنائية الأبعاد لمساحة السطح. ويبدو الأمر وكأن أفق الحدث للثقب الأسود يعمل مثل هولوغرام، وذلك باقتناص كل محتوى الثقب الأسود ذي الثلاثة أبعاد الداخلية من المعلومات. وقد عمم ساسكيند وت. هوفت هذه الفكرة على كل الكون، وذلك باقتراح أن كل ما يحدث في "داخل" العالم هو مجرد انعكاس لبيانات ومعادلات محددة على سطح بعيد يحدها. وحديثاً، فإن الأبحاث التي أجراها جوان مالداسينا، الفيزيائي من جامعة هارفارد مع الأبحاث الهامة التي تلت ذلك بواسطة ويتن والفيزيائيين من جامعة برنستون ستيفن جاسبر، وإيغور كليبانوف، وألكسندر بولياكوف، قد بينت أنه على الأقل في حالات معينة، تتضمن نظرية الأوتار "مبدأ التجسيم". وبطريقة تخضع حالياً لدراسات مستفيضة، يبدو أن فيزياء الكون المحكومة بنظرية الأوتار تتميز بأن لها توصيفاً مكافئاً يتضمن فقط الفيزياء التي تجرى على مثل هذا السطح المحدد - سطح بالضرورة له أبعاد أقل مما في الداخل. وقد اقترح بعض منظري نظرية الأوتار، أن الفهم الكامل لمبدأ التجسيم ودوره في نظرية الأوتار قد يؤدي إلى الثورة الثالثة للأوتار الفائقة.

أن للعالم أبعاداً كثيرة، أكثر مما كنا على دراية به، وبعض هذه الأبعاد متجعد في أشكال دقيقة لكنها معقدة، يمكن أن تحدث لها تحولات غريبة تتقلص وتتمزق أثناءها هذه الأبعاد ثم تصلح من نفسها.

وقد حاولنا من خلال الرسوم التوضيحية مثل الأشكال أرقام (3-4)، (3-6)، و(8-10)، أن نصور هذه الأفكار بأن نتخيل نسيج الفضاء والزمكان كما لو كان قطعة من القماش ثم تفصيل الكون منها. ولهذه الصور مقدرة عالية على التفسير، فهي تستخدم بانتظام بواسطة الفيزيائيين كدليل مرئي في أبحاثهم التقنية. ومع أن التحديق في الأشكال مثل تلك التي ذكرناها الآن يعطي انطباعاً تدريجياً بالمعنى، إلا أن المرء ما زال يتساءل ما الذي نعنيه بالضبط بكلمة نسيج الكون؟

وهو سؤال وجيه كان مجالاً للجدل على مدى مئات السنين بشكل أو بآخر. أعلن نيوتن أن المكان والزمان أبديان، وأنهما مكونان غير قابلين للتغير في تركيب الكون، وأنهما بنيتان أساسيتان تقعان خارج حدود أية أسئلة أو تفسيرات. وكما كتب نيوتن في كتابه "برينسيبيا" (Principia)، "يظل المكان المطلق في طبيعته الخاصة من دون أية صلة بأي شيء خارجي، يظل دائماً هو نفسه وبلا حراك. وينساب الزمن الرياضي المطلق والحقيقي انطلاقاً من طبيعته وبرصانة من دون التأثر بأي شيء خارجي"[3]. لكن غوتفرايد لايبنيز وآخرين قد اختلفوا مع نيوتن بشدة زاعمين أن المكان والزمن هما مجرد أمرين لحفظ موجز العلاقات بين الأشياء والأحداث في نطاق الكون بشكل مريح. فموقع أي جسم في المكان والزمان يكتسب معنى فقط بعلاقته بالآخرين. وليس المكان والزمان إلا مفردات لهذه العلاقات ولا شيء آخر. ومع أن وجهة نظر نيوتن قد تدعمت بالنجاحات التجريبية لقوانين الحركة الثلاثة، واحتفظت بتسلطها لأكثر من مائتي عام، إلا أن مفهوم لايبنيز، الذي طوره الفيزيائي النمساوي إرنست ماتش، أقرب كثيراً إلى الصورة الحالية. وكما رأينا فإن نظريتي النسبية الخاصة والعامة لآينشتاين قد أزاحتا بعيداً المفهوم الكوني المطلق للزمان والمكان. غير أننا ما زلنا نتساءل عما إذا كان النموذج الهندسي للزمكان الذي يلعب دوراً أساسياً في النسبية العامة وفي نظرية الأوتار هو فقط وحده الاختزال المريح للعلاقات الفضائية والزمانية بين المواقع المختلفة، أم أننا يجب أن ننظر إلى أنفسنا على أننا ضمن "شيء ما" عندما نشير إلى انغماسنا في نسيج الزمكان.

(3) Isaac Newton, *Sir Isaac Newton's Mathematical Principles of Natural Philosophy and His System of the World,* 2 vols., Translated by Andrew Motte and Florian Cojori (Barkely, CA: University of California Press, 1962), vol. I, p. 6.

وبالرغم من أننا نتجه نحو منطقة تخمينية، إلا أن نظرية الأوتار تقدم إجابة على هذا السؤال. فالغرافيتون الذي يعتبر أصغر حزمة من قوى الجاذبية، هو نسق معين من أنساق الاهتزازات الوترية. وكما في حالة المجال الكهرومغناطيسي مثل الضوء المرئي الذي يتكون من عدد هائل من الفوتونات، فإن مجال الجاذبية يتكون هو الآخر من عدد هائل من الغرافيتونات - أي من عدد هائل من الأوتار التي تمارس النسق الاهتزازي للغرافيتون. وتتشفر المجالات الجاذبية بدورها في اعوجاج (تشوهات) نسيج الزمكان، وعليه فإننا مضطرون لتحديد نسيج الزمكان نفسه بعدد هائل من الأوتار التي تمارس جميعها نفس أنساق الغرافيتون الاهتزازية المرتبة. وفي لغة مناسبة لهذا الموضوع، يطلق على مثل هذا العدد الهائل المرتب من الأوتار التي تتذبذب بنفس الشكل "حالة تماسك الأوتار" (Coherent State). إنها بالأحرى صورة شاعرية - فالأوتار في نظرية الأوتار مثل خيوط نسيج الزمكان - لكن لا بد من الإشارة إلى أن معناها الحقيقي ما زال علينا أن نتوصل إليه بشكل كامل.

ومع ذلك، فإن وصف نسيج الزمكان في إطار صورة هذه الأوتار المحاكة بعضها مع بعض هذه يقودنا إلى التعرض للسؤال التالي. فأية قطعة عادية من نسيج هي نتاج نهائي لمجموعة من خيوط متفرقة تم نسجها بعناية ، وهي المادة الأولية للنسيج المألوف. وبالمثل يمكن أن نتساءل عما إذا كان هناك أسلاف أولية لنسيج الزمان - تشكيلة من أوتار نسيج الكون التي لم تلتئم بعد في الشكل المنظم الذي نعرفه باسم الزمكان. وتجدر ملاحظة أن تصوير الكتلة غير المنتظمة للأوتار المتذبذبة المختلفة التي ما زالت لم تلتئم بعضها مع بعض بعد في نسيج مرتب يعتبر أمراً غير دقيق إلى حد ما، وذلك لأنه في إطار طريقتنا المعتادة في التفكير فإن ذلك يقترح مفهوماً مسبقاً للمكان والزمان - المكان الذي يتذبذب فيه الوتر وانسياب الزمن الذي يسمح لنا بتتبع التغير في الشكل من لحظة لأخرى. غير أنه في الحالة الأولية، وقبل أن تنتظم الأوتار التي تشكل النسيج الكوني في رقصة اهتزازية منتظمة ومتناغمة، ليس هناك "إدراك للمكان أو الزمان". وحتى لغتنا قاصرة عن التعامل مع هذه الأفكار، لأنه في الحقيقة لا يوجد مفهوم لكلمة "قبل". وبشكل ما، فإن الأوتار المتفرقة هي بمثابة "كِسْرات" من المكان والزمان، ولا يتضح المفهوم المتفق عليه للمكان والزمان إلا بعد أن تندمج هذه الأوتار في اهتزازات متجانسة.

ويقف المرء عاجزاً عن تخيل مثل هذه الحالة البدائية للوجود والتي بلا بنية معينة، تلك الحالة التي ليس لها مفهوم عن المكان أو الزمان كما نعرفهما (وهو

ما أعانيه أنا نفسي). وكما كتب ستيفن رايت عن المصور الذي كان مهووساً بالحصول على صورة من قرب للأفق، فإننا نواجه صداماً مع الأمثلة عندما نحاول تخيل عالم لا يحتوي بشكل أو بآخر مفاهيم للمكان أو الزمان. ومع ذلك، فمن الأرجح أننا لا بد من أن نتفق مع مثل هذه الأفكار ونفهم استخداماتها قبل أن ندرك تماماً نظرية الأوتار. والسبب في ذلك يكمن في أن صياغتنا الحالية لنظرية الأوتار تفترض مسبقاً وجود المكان والزمان اللذين تتحرك داخلهما الأوتار وتتذبذب (وكذلك بقية المكونات الموجودة في نظرية-M). ويسمح لنا ذلك باستنتاج الخواص الفيزيائية لنظرية الأوتار في عالم له بعد زماني واحد، وعدد معين من الأبعاد الفضائية الممتدة (عادة تؤخذ على أنها ثلاثة)، وأبعاد إضافية متجعدة في أحد الأشكال التي تسمح بها معادلات النظرية. ويشبه ذلك إلى حد ما تقويم موهبة ابتكار فنانة يطلب منها أن تقوم بنقل لوحة من مجموعة مرقمة. فإنها بلا جدال ستضيف هنا وهناك لمسة شخصية، لكننا بتقييدنا لعملها بشدة ملزمة، لا نرى تماماً كل موهبتها ما عدا قدر ضئيل منها. وبالمثل، وحيث أن عظمة نظرية الأوتار تكمن في تضمينها الطبيعي لميكانيكا الكم والجاذبية، وحيث أن الجاذبية مرتبطة بشكل المكان والزمان، فلا يجب أن نقيد النظرية بإجبارها على العمل داخل إطار للزمكان موجود بالفعل. فإذا سمحنا للفنانة بأن ترسم لوحتها على قطعة خَيْش بِحُرِّية، فإن علينا أن نسمح لنظرية الأوتار بأن تضع لنفسها بنفسها ساحة الزمكان وذلك بالبدء من تركيبة لا مكان ولا زمان فيها.

والأمل معقود في أن النظرية ستصف عالماً تطور إلى شكل ظهرت فيه خلفية متماسكة من الاهتزازات الوترية مؤدية إلى المفهوم المتفق عليه للمكان والزمان، وذلك بدءاً من نقطة البداية الخالية - التي من المحتمل أن تكون في عصر سابق للانفجار الهائل (إذا كان في استطاعتنا استخدام مصطلحات تتعلق بالزمان لعدم وجود إي إطار لغوي آخر). فإذا كان مثل هذا الإطار موجوداً، فإنه سيبين أن المكان والزمان، وبالتبعية أيضاً الأبعاد، ليست كلها عناصر أساسية محددة للكون. وبالأحرى فإنها مفاهيم مريحة نبعت من حالات أولية أساسية مغرقة في السلفية.

وقد أظهرت البحوث الرائدة حول سمات نظرية-M التي قادها عدد كبير من الفيزيائيين ومنهم ستيفن شينكر وإدوارد ويتن وتوم بانكس وويلي فيشلر وليونارد ساسكيند، أن هناك شيئاً ما يعرف باسم الغشاء صفر (بران-صفر Zero Brane) - من المحتمل أن يكون هو العنصر الأساسي في نظرية-M، وهو الشيء الذي يسلك إلى حد ما مثل الجسيمة النقطة في المسافات الكبيرة، لكن له صفات مختلفة جذرياً في المسافات القصيرة - يمكن أن يقدم لنا لمحة عن دنيا اللامكان

واللازمان. وقد كشفت أبحاثهم أنه بينما تبيّن لنا الأوتار أن المفاهيم المتفق عليها للمكان تعجز عن كشف ما تحت مقاييس بلانك، فإن الغشاء صفر (بران - صفر) يعطي نفس النتيجة في الأساس ويلقي بصيصاً من الضوء على إطار جديد غير مألوف والذي سيتسيد الموقف. وقد بينت الدراسات التي أجريت على هذه الأغشية الصفرية أن الهندسة العادية سيحل محلها شيء ما يعرف باسم الهندسة اللاتبادلية (Noncommutative)، وهي قطاع من الرياضيات تطور في معظمه بواسطة عالم الرياضيات الفرنسي آلان كونز[4]. وفي هذا الإطار الهندسي تختفي المفاهيم المتفق عليها للمكان والمسافات بين النقاط وتتركنا بمفاهيم مختلفة تماماً عن المكان. ومع ذلك، إذا ركزنا انتباهنا على أطوال أكبر من طول بلانك، أظهر الفيزيائيون أن مفهومنا التقليدي للمكان يعود إلى الظهور بالفعل. ومن المرجح أن إطار الهندسة اللاتبادلية ما زال بعيداً عن حالة بلانك الخالية التي أشرنا لها من قبل بعدة خطوات ملحوظة، لكنها تقدم إشارة من الإطار الأكثر شمولاً الذي من المحتمل أن يضم المكان والزمان.

ومن أهم الموضوعات التي تواجه منظري نظرية الأوتار إيجاد الأدوات الرياضية الصحيحة لصياغة نظرية الأوتار من دون العودة إلى مفهوم ما قبل وجود المكان والزمان. وفهمنا للكيفية التي بزغ بها المكان والزمان سيأخذنا خطوة عظيمة نحو الإجابة عن السؤال المحوري حول أي الصيغ الهندسية هي التي بزغت بالفعل.

ثالثاً: هل تؤدي نظرية الأوتار إلى إعادة صياغة ميكانيكا الكم؟

تتحكم مبادئ ميكانيكا الكم في الكون بدقة خيالية. ومع هذا، فإن الفيزيائيين عند صياغتهم للنظريات على مدى نصف القرن الماضي، اتبعوا استراتيجية تضع ميكانيكا الكم في المرتبة الثانية إلى حد ما. وعند وضع النظريات، يبدأ الفيزيائيون غالبا في العمل بلغة كلاسيكية بحتة تهمل الاحتمالات الكمية والدالات الموجية وما شابه ذلك - اللغة التي تناسب تماماً الفيزيائيين من عصر ماكسويل وحتى عصر نيوتن - ثم يأخذون بعد ذلك في وضع المفاهيم الكمية في الإطار الكلاسيكي. وليس هذا المنطلق مفاجأة بالتحديد، حيث إنه يعكس مباشرة خبراتنا.

(4) إذا كنت على دراية بالجبر الخطي، فإن إحدى الطرق البسيطة والمناسبة للتفكير في الهندسة اللاتبادلية هو استبدال المحاور الديكارتية المعروفة - التي تستبدل بعملية الضرب - بواسطة مصفوفات لا يحدث لها ذلك.

ولأول وهلة يبدو الكون محكوماً بقوانين متجذرة في المفاهيم الكلاسيكية مثل كون الجسيمة لها موقع محدد وسرعة محددة في أية لحظة من الزمن. ولم نتحقق من أن علينا أن نعدل مثل هذه الأفكار الكلاسيكية المألوفة إلا بعد عمل شاق على المستوى الميكروسكوبي التفصيلي. وقد تطورت عملياتنا للاستكشاف من الإطار الكلاسيكي إلى إطار آخر تم تعديله بواسطة الاكتشافات الكمية، وقد ظهر صدى هذا التطور في الطريقة التي يبني بها الفيزيائيون نظرياتهم حتى يومنا هذا.

وهذا بالتأكيد هو الحال في ما يتعلق بنظرية الأوتار. فتبدأ الصياغة الرياضية التي تصف نظرية الأوتار بمعادلات تصف حركة قطعة خيط تقليدية في غاية الدقة والصغر والرقة - المعادلات التي كان في مقدور نيوتن كتابتها منذ حوالى 300 سنة مضت. وقد تمت كنتمة (Quantized) هذه المعادلات بعد ذلك. أي أن المعادلات الكلاسيكية قد تحولت إلى إطار من ميكانيكا الكم يتضمن الاحتمالات وعدم التيقن والاضطرابات الكمية وغيرها مباشرة، وذلك بطريقة منهجية طورها الفيزيائيون على مدى أكثر من خمسين سنة. وفي الواقع قد رأينا في الفصل 12 ممارسة هذه الطريقة بالفعل: عمليات الحلقة (في الشكل رقم (12-6)) تتضمن مفاهيم كمية - التخليق اللحظي الكمي لأزواج الأوتار الافتراضية - حيث يحدد عدد الحلقات الدقة التي تتحدد بها التأثيرات الكمية.

كانت استراتيجية البدء بالوصف النظري الكلاسيكي ثم إتباعه بتضمين سمات ميكانيكا الكم ذات فوائد جمة لسنوات عديدة. فهذه الاستراتيجية مثلاً تكمن في أساس النموذج القياسي لفيزياء الجسيمات. لكن من المحتمل أن تكون هذه الطريقة محافظة أكثر من اللازم، فهناك أدلة متنامية على ذلك عند التعامل مع نظريات متقدمة مثل نظرية الأوتار ونظرية-M. والسبب في ذلك أنه عندما نقر بأن العالم محكوم بمبادئ ميكانيكا الكم، فإن على نظرياتنا أن تكون هي الأخرى خاضعة لمبادئ ميكانيكا الكم منذ البداية. ولقد نجحنا في البدء بالمنظور الكلاسيكي حتى الآن لأننا لم نكن نختبر الكون عند مستويات بهذا العمق، وبالتالي فإن هذا المنطلق التقريبي لم يكن يخدعنا في السابق. غير أنه على المستوى العميق لنظرية الأوتار/-M، ربما نكون قد وصلنا إلى نهاية المطاف في استخدامنا لهذه الاستراتيجية.

ويمكن أن نجد أدلة معينة على ذلك بإعادة النظر في بعض الأفكار التي نبعت من ثورة الأوتار الفائقة الثانية (كما أوجزنا في الشكل رقم (12-11) مثلاً). وكما ناقشنا في الفصل 12، فإن الثنائية الكامنة وراء وحدة نظريات الأوتار الخمس تبين أن العمليات الفيزيائية التي تحدث في أية صياغة لنظرية الأوتار، يمكن إعادة

تحليلها في سياق ثنائية أية نظرية أخرى. وستبدو إعادة الصياغة تلك، لأول وهلة لا علاقة لها بالوصف الأصلي، لكن، في الحقيقة، فهذا يمثل ببساطة مقدرة الثنائيات عند تطبيقها: فمن خلال الثنائيات يمكن وصف عملية فيزيائية معينة بعدد كبير من الطرق المختلفة. وهذه النتائج دقيقة وجديرة بالملاحظة، لكننا لم نشر بعد إلى أكثر صفاتها أهمية.

فإذا أخذنا التحولات الثنائية، والتي غالباً ما تتم خلال عمليات تعتمد بقوة على ميكانيكا الكم، التي يتم وصفها في إحدى النظريات الخمس للأوتار، (مثلاً العملية المتضمنة للتداخلات، التي لم تكن لتحدث إذا كان العالم محكوماً بالفيزياء الكلاسيكية وليست الفيزياء الكمية) ونعيد تشكيلها كعملية تعتمد بشكل ضعيف على ميكانيكا الكم من منظور إحدى النظريات الأخرى للأوتار (فمثلاً العملية التي تتأثر خواصها العددية التفصيلية بالاعتبارات الكمية، لكن صورتها الكيفية تناظر ما كان يمكن أن تكون عليه في عالم كلاسيكي بحت). ويعني ذلك أن ميكانيكا الكم متشابكة بشدة داخل تناظرات الثنائيات التي تكمن في أساس نظرية الأوتار/ M-. إنها في صلبها تناظرات كمية، حيث أن أحد التوصيفات الثنائية يتأثر بشدة بالاعتبارات الكمية. ويشير ذلك بقوة إلى أن الصياغة الكاملة لنظرية الأوتار/ M-، - الصياغة التي تتضمن أساساً تناظرات الثنائيات المكتشفة حديثاً - لا يمكن أن نبدأها بطريقة كلاسيكية ثم نعالجها بعد ذلك كمياً، بالطريقة التقليدية. فإن البدء بالطريقة الكلاسيكية سيهمل تماماً التناظرات الثنائية، حيث إنها تصبح صحيحة فقط عندما تؤخذ ميكانيكا الكم في الاعتبار. ويبدو أن الصياغة الكاملة لنظرية الأوتار/ M- لا بد من أن تحطم القالب التقليدي وتقفز إلى الوجود على شكل نظرية كمية تامة البناء.

وحالياً لا يعرف أحد كيف ينجز ذلك. لكن الكثير من منظري نظرية الأوتار يرون أن إعادة صياغة الكيفية التي تتضمن بها المبادئ الكمية في الوصف النظري للعالم هي الطفرة العظمى القادمة في إدراكنا. وكما قال كومرون فافا، "إنني أعتقد أن إعادة صياغة ميكانيكا الكم بشكل يحل الكثير من أحجياتها قريب المنال جداً". وأعتقد أن الكثيرين يشاركونني الرأي بأن الثنائيات المكتشفة حديثاً تشير إلى إطار هندسي جديد لميكانيكا الكم، فيه سيكون المكان والزمان والخواص الكمية مرتبطة برباط لا ينفصم[5]. أما إدوارد ويتن فقد قال، "إنني أعتقد أن الحالة المنطقية لميكانيكا الكم ستتغير بشكل يشبه الطريقة التي تغيرت بها الحالة

(5) مقابلة مع كومرون فافا في 12 كانون الثاني/ يناير 1998.

المنطقية للجاذبية عندما اكتشف آينشتاين مبدأ التكافؤ. وهذه العملية لم تكتمل بعد لميكانيكا الكم، لكنني أعتقد أن الناس يوماً ما سينظرون إلى الوراء نحو عصرنا على أنه الفترة التي بدأت فيها هذه العملية"[6].

وبتفاؤل حذر يمكننا أن نتخيل أن إعادة صياغة إطار مبادئ ميكانيكا الكم داخل نظرية الأوتار قد تؤدي إلى صياغة أقوى بكثير لها المقدرة على الإجابة عن السؤال كيف بدأ العالم، ولماذا توجد هناك أشياء مثل المكان والزمان - الصياغة التي ستأخذنا خطوة أقرب نحو الإجابة عن سؤال لايبنيز عن لماذا يوجد شيء ما بدلاً من اللاشيء.

رابعاً: هل يمكن اختبار نظرية الأوتار تجريبياً؟

ومن بين السمات العديدة لنظرية الأوتار التي ناقشناها في الفصول السابقة قد تكون الصفات الثلاث الآتية هي أهمها والتي يجب أن نتذكرها جيداً. الصفة الأولى، الجاذبية وميكانيكا الكم أجزاء مكملة بعضها من بعض في كيفية سير الكون، وبالتالي فإن أية نظرية موحدة ذات معنى لا بد أن تتضمنهما. وتفي نظرية الأوتار بهذا. الصفة الثانية، كشفت دراسات الفيزيائيين خلال القرن الماضي أن هناك أفكارا أخرى رئيسية - تم التحقق من معظمها تجريبياً - تبدو مركزية في فهمنا للكون. وتتضمن هذه الأفكار مفاهيم الحركة المغزلية، وبنية عائلة جسيمات المادة، والجسيمات المراسلة، والتناظر القياسي، ومبدأ التكافؤ، وانهيار التناظر، والتناظر الفائق، وهي قليل من كثير. وتنبع كل هذه المفاهيم طبيعياً من نظرية الأوتار. الصفة الثالثة، وعلى عكس النظريات المتفق عليها، مثل النموذج القياسي الذي يضم 19 مؤشراً حراً من الممكن تعديلها لتؤكد التوافق مع القياسات التجريبية، فإن نظرية الأوتار ليس لها مؤشرات قابلة للتعديل. ومن ناحية المبدأ، فإن تضمينات النظرية لا بد من أن تكون محددة كلية - لا بد من أن تمدنا باختبارات لا غموض فيها حول ما إذا كانت النظرية نفسها صحيحة أم لا.

والطريق الذي ينقلنا من عبارة "من ناحية المبدأ" (النتائج النظرية) إلى عبارة "عملياً" في الحقيقة محفوف بالمخاطر. وقد شرحنا في الفصل 9 بعض هذه المعوقات التقنية مثل تحديد شكل الأبعاد الإضافية التي تعترض طريقنا. وقد شرحنا في الفصلين 12، 13 هذه المعوقات وغيرها بمفهومها العريض وفي ضوء حاجتنا لفهم دقيق لنظرية الأوتار، الذي يقودنا طبيعياً نحو نظرية-M وبلا شك

(6) مقابلة مع إدوارد ويتن في 11 أيار/ مايو 1998.

فإن الوصول إلى الفهم الكامل لنظرية الأوتار/ M- يتطلب مجهوداً شاقاً وكماً كبيراً من التفوق الذهني.

وفي كل خطوة على الطريق كان منظرو نظرية الأوتار يبحثون وسيظلون يبحثون عن النتائج التي يمكن الحصول عليها تجريبياً من نظرية الأوتار. وعلينا ألا نغمض أبصارنا عن الاحتمالات البعيدة لإيجاد البراهين على نظرية الأوتار التي ناقشناها في الفصل 9. وغير ذلك، فإننا كلما تعمقنا في فهم هذه النظرية سيكون هناك بلا جدال عمليات أخرى نادرة أو صفات لنظرية الأوتار تقدم بصمات أخرى تجريبية غير مباشرة.

والأمر الأكثر جدارة بالملاحظة هو التأكد من التناظر الفائق عن طريق اكتشاف الجسيمات الشركاء الفائقة كما ناقشنا ذلك في الفصل 9، الذي يعد علامة بارزة على طريق نظرية الأوتار. ولنتذكر أن التناظر الفائق قد تم اكتشافه في سياق الدراسات النظرية لنظرية الأوتار، وأنه جزء أساسي في النظرية. وسيكون التأكد منه تجريبياً دليلاً قاطعاً على صحة نظرية الأوتار وإن يكن ظرفياً. والأكثر من ذلك، فإن اكتشاف الجسيمات الشركاء الفائقة سيقدم خطوة عظيمة، حيث أن اكتشاف التناظر الفائق سيكون له أثر أكبر كثيراً من مجرد الإجابة عن السؤال بنعم أو لا حول ملاءمته لعالمنا. وستكشف كتل وشحنات الجسيمات الشركاء الفائقة الطريق التفصيلي لتضمين التناظر الفائق في قوانين الطبيعة. وفي هذه الحالة سيواجه منظرو نظرية الأوتار تحدياً حول ما إذا كان هذا التضمين يمكن إدراكه كلية أو تفسيره بواسطة نظرية الأوتار. ومن الطبيعي أن نكون أكثر تفاؤلاً ونأمل خلال العقد القادم أن يكون إدراكنا لنظرية الأوتار قد تقدم بما فيه الكفاية - قبل إطلاق معجل هادرون الكبير في جنيف Large Hadron Collider - ليمكننا من التنبؤ تفصيلياً بالشركاء الفائقين قبل اكتشافهم المأمول. وسيكون التأكد من مثل هذه التنبؤات لحظة بارزة عظيمة في تاريخ العلم.

خامساً: هل هناك حدود للتفسير؟

يعتبر تفسير كل شيء، وحتى بالمعنى العام لفهم كل سمات القوى والمكونات الأولية للكون، واحداً من أعظم التحديات التي يواجهها العلم. ولأول مرة تمنحنا نظرية الأوتار الفائقة إطاراً يبدو أن له عمقاً كافياً لمواجهة هذا التحدي. لكن هل سنتحقق من كل ما تعد به النظرية بالكامل، مثل حساب كتلة الكواركات أو شدة القوى الكهرومغناطيسية، وهي الأعداد التي تفرض قيمتها الكثير من عالمنا؟ وكما في المقطع السابق، فإن علينا أن نتخطى العقبات النظرية العديدة في

الطريق إلى هذه الأهداف - وأكثرها أهمية هو التوصل إلى صياغة لا اضطرابية كاملة لنظرية الأوتار/ M-.

ولكن هل من المحتمل، حتى لو كان لدينا فهم دقيق لنظرية الأوتار/ M- في إطار جديد لصياغة أكثر شفافية لميكانيكا الكم، أن نفشل مع ذلك في مسألة حساب كتلة الجسيمات وشدة القوة؟ وهل من المحتمل أن نظل نعول على القياسات التجريبية بدلاً من الحسابات النظرية للتوصل لهذه القيم؟ وما هو أكثر من ذلك، هل من المحتمل أن هذا الفشل لا يعني أننا بحاجة إلى نظرية أعمق، لكنه ببساطة يعكس عدم وجود تفسير لهذه الخواص الظاهرية في الواقع؟

وإحدى الإجابات اللحظية عن هذه الأسئلة هي نعم. وكما قال آينشتاين: "إن أقل الأشياء فهماً عن الكون هو كونه شاملاً"[7]. وفي عصرٍ سريع التقدم المؤثر سرعان ما تخبو دهشتنا تجاه مقدرتنا على فهم العالم كلية. ومع ذلك فقد يكون هناك حد للفهم الشامل. وربما علينا أن نتقبل أنه بعد الوصول لأعمق المستويات الممكنة التي يقدمها العلم، ما زالت هناك مع ذلك أمور في الكون من دون تفسير. وربما علينا أن نتقبل أن هناك سمات معينة للكون هي على ما هي عليه بالصدفة أو نتيجة حادث أو هي اختبار إلهي. وقد شجعنا نجاح المنهج العلمي في الماضي على أن نعتقد أنه لو توفر الزمن الكافي والجهد فإننا قادرون على اكتشاف ما غمض من الطبيعة. لكن الوصول إلى الحد الأقصى المطلق للتفسير العلمي - ليس عقبة تقنية ولا النهاية الحالية للفهم المتقدم عند الإنسان - سيمثل حدثاً متفرداً، وهو الحدث الذي لا يمكن أن نكون مستعدين له بخبرتنا الماضية.

ومع أن ذلك يتواءم مع مسألة النظرية النهائية، إلا أنه موضوع لا نستطيع التوصل إلى حل له بعد، وبالفعل فإن احتمال وجود حدود للتفسير العلمي، بالمعنى العريض الذي ذكرناه، أمر يمكن ألا نصل إليه أبداً. ولقد رأينا على سبيل المثال، أنه حتى المفهوم التخميني للكون المتعدد، يبدو لأول وهلة أنه يقدم نهاية محددة للتفسير العلمي، يمكن التعامل معه بتصور نظريات على نفس القدر من التخمينية، على الأقل من ناحية المبدأ، تكون لها القدرة على استعادة المقدرة التنبئية.

وأحد الأمور الهامة التي بزغت من هذه الاعتبارات هو دور الكوسمولوجيا

(7) مقتطف من: Banesh Hoffman and Helen Dukas, *Albert Einstein: Creator and Rebel* (New York: Viking, [1972]), p. 18.

في تحديد تطبيقات نظرية نهائية. وكما ناقشنا، فإن كوسمولوجية الأوتار الفائقة مجال حديث حتى بالمقاييس الحديثة لنظرية الأوتار نفسها. وبلا شك، ستكون مجالاً للأبحاث الأولية لعدة سنوات قادمة، ومن المرجح أن تكون واحدة من المناطق العظمى في هذا المجال. وباستمرار اكتسابنا لأفكار جديدة حول خواص نظرية الأوتار/-M فإن مقدرتنا على تقويم التطبيقات الكوسمولوجية لهذه المحاولة الثرية تجاه نظرية موحدة ستزداد حدة. وطبيعي أنه من المحتمل أن مثل هذه الدراسات قد تقنعنا يوماً ما بأن هناك بالفعل حدًّا للتفسير العلمي. غير أنه هناك احتمال عكسي آخر أن توصلنا إلى عصر جديد - عصر نستطيع فيه أن نعلن أننا قد اكتشفنا أخيراً التفسير الأساسي للكون.

سادساً: محاولة الوصول إلى النجوم

على الرغم من أننا مرتبطون تقانياً بالأرض وكذلك بجيرانها المباشرين في المجموعة الشمسية، فإننا من خلال المقدرة على التفكير وعلى التجريب قد اختبرنا الآفاق البعيدة للفضاء الداخلي والخارجي. ومن خلال الجهود الجماعية للعديد من الفيزيائيين تم اكتشاف بعض أهم أسرار الطبيعة خلال المائة عام المنصرمة بصفة خاصة. وبمجرد اكتشافها، فإن تلك الجواهر التفسيرية قد فتحت آفاقا على عالم كنا نتخيل أننا نعرفه، إلا أننا لم نقترب حتى من تخيل عظمته. وأحد مقاييس عمق أية نظرية فيزيائية هو المدى الذي تثير فيه تحديات جدية في مواجهة نظرتنا للعالم، التي بدت في السابق وكأنها غير قابلة للتغير. وبهذا المقياس فإن ميكانيكا الكم والنظريتين النسبيتين لهما من العمق ما يتخطى أكثر توقعاتنا شططاً، مثل: الدالات الموجية، والاحتمالات، والأنفاق الكمية، وجيشان وهياج التأرجحات التي لا تخمد في الفراغ، والالتحام بين الزمان والمكان، والطبيعة النسبية للتلقائية، وتشوه نسيج الزمكان، والثقوب السوداء، والانفجار الهائل. من كان يتصور أن المنظور الحدسي والميكانيكي الذي يعمل كالساعة لنيوتن يمكن أن يتحول إلى منظور محدود تماماً - إن هناك عالماً جديداً يثير العقول موجود تحت سطح الأشياء المألوفة لنا مباشرة؟

لكن هذه الاكتشافات التي غيرت عالم الأنماط المألوفة، ما هي إلا جزء من رواية أكبر تشمل كل شيء. ويحاول الفيزيائيون بلا كلل الوصول إلى النظرية الموحدة المراوغة مسلحين بعقيدة قوية في أن القوانين التي تحكم الأشياء الكبرى والأشياء الصغرى لا بد من أن تتلاءم معاً في وحدة متماسكة. لم ينته البحث بعد، لكن من خلال نظرية الأوتار الفائقة وتطورها إلى نظرية الأوتار/-M، بزغ

أخيراً إطار مقنع قوي يمزج ميكانيكا الكم والنسبية العامة والقوى القوية والضعيفة والكهرومغناطيسية معاً. والتحديات التي وضعتها هذه التطورات في مواجهة طريقنا السابق لرؤية العالم عظيمة مثل: حلقات الأوتار والكريات المتذبذبة، ودمج كل الكائنات في أنساق اهتزازية تكونت بدقة متناهية في عالم له أبعاد خفية متعددة قادرة على القيام بالتواءات حادة يتمزق خلالها نسيجها الكوني ثم يعيد إصلاح نفسه. من كان يتصور أن دمج الجاذبية وميكانيكا الكم في نظرية موحدة لكل المادة وكل القوى سيؤدي لمثل هذه الثورة في فهمنا لكيفية عمل الكون؟

وبلا شك ما زالت هناك مفاجآت أكبر في الجعبة، تنتظرنا في مواصلتنا البحث عن فهم كامل لنظرية الأوتار يمكن تتبعه حسابياً ، ومن خلال دراستنا لنظرية -M، رأينا بالفعل لمحات خاطفة لمنطقة جديدة وغريبة من العالم مختبئة تحت طول بلانك، وهي المنطقة التي يحتمل ألا يوجد فيها مفهوم للمكان أو الزمان. وفي أقصى الناحية المضادة الأخرى رأينا أن عالمنا قد يكون واحداً من فقاعات رغوية لا حصر لها على سطح محيط كوني شاسع مضطرب يسمى العالم المتعدد. وتوجد هذه الأفكار في مقدمة التخمينات الحالية، لكنها قد تكون بشيراً بالقفزة القادمة نحو فهمنا للكون.

وإذا ما ركزنا أنظارنا على المستقبل، واستبقنا كل العجائب التي ما زالت في الجعبة، فإن علينا أن نسترجع ما سبق ونندهش للرحلة التي قطعناها حتى الآن. فالبحث عن القوانين الأساسية للكون هو دراما بشرية متميزة، الدراما التي فتحت العقول وأثرت في النفوس. وقد تضمن وصف آينشتاين الجلي لبحثه في فهم الجاذبية، بكل تأكيد كل النضال البشري - "سنوات البحث القلق في الظلام بكل ما فيها من تطلع شديد ولحظات التحول من الثقة إلى الإرهاق، ثم أخيراً الخروج إلى الضوء"[(8)]. وكلنا، كل واحد منا بطريقته، باحثون عن الحقيقة، وكل واحد منا يتطلع إلى الإجابة عن السؤال لماذا نحن هنا. وبصعودنا الجماعي نحو قمة جبل التفسيرات، فإن كل جيل يقف بثبات فوق أكتاف الجيل السابق متطلعين بشجاعة نحو القمة. فهل يا ترى سيحدث أن ينظر أحد أحفادنا من القمة ليتطلع إلى الكون الأنيق الشاسع بمنظور لانهائي الوضوح، إنه أمر لا نستطيع التنبؤ به. ولكن كلما صعد جيل لمسافة أعلى، سندرك مقولة جاكوب برونوفسكي أن "هناك نقطة تحول في كل سن، وطريقة جديدة لرؤية وتأكيد تماسك العالم"[(9)].

(8) R. W. Clark, "Einstein: The Life and Times," *Science*, no. 174, pp. 1315-1316. (Martin J. Klein)

(9) Jacob Bronowski, *The Ascent of Man* (Boston: Little, Brown, 1973), p. 20.

وهكذا، كما يندهش جيلنا برؤيتنا الجديدة للعالم - طريقتنا الجديدة لتأكيد تماسك العالم - فإننا ننفذ بذلك الجزء الخاص بنا، مساهمين بدرجة في سلم البشرية المتطلعة نحو النجوم.

الثبت التعريفي

اثنان بران (غشاء) **Two-Brane**

انظر بران (غشاء) Brane.

الازدواج الضعيف **Weakly Coupled**

النظريات التي لها ثابت ازدواج الوتر String Coupling Constant أقل من 1.

ازدواج بقوة (قوية الازدواج) **Strongly Coupled**

النظرية التي فيها ثابت ازدواج الوتر أكبر من 1.

إشعاع **Radiation**

الطاقة المحمولة على جسيمات أو موجات.

الإشعاع الكهرومغناطيسي **Electromagnetic radiation**

الطاقة التي تحملها الموجة الكهرومغناطيسية Electromagnetic Wave.

أفق الحدث **Event Horizon**

سطح الثقب الأسود الذي يمرر الأشياء في اتجاه واحد، فإذا اخترقه شيء ما فإن قوانين الجاذبية لن تسمح له بالعودة، فلا فكاك من قبضة الجاذبية الهائلة للثقب الأسود.

الإلكترون **Electron**

جسيمة لها شحنة سالبة، توجد عادة تدور في مدارات حول نواة الذرة Atom.

الأنتروبية **Entropy**

مقياس عدم الترتيب في نظام فيزيائي؛ عدد مرات إعادة الترتيب لمكونات نظام تحقق عدم تغير مظهره العام.

أنتروبية الثقب الأسود **Black-Hole Entropy**

الأنتروبية المتضمنة في الثقب الأسود Black Hole.

الأنفاق الكمية **Quantum Tunneling**

سمة من سمات ميكانيكا الكم Quantum Mechanics تبين أن الأجسام يمكنها أن تعبر من خلال الحواجز التي لا يمكن أن تسمح بمرور أي شيء تبعاً لقوانين نيوتن الكلاسيكية في الفيزياء.

الانفجار الهائل **Big Bang**

النظرية المقبولة حالياً عن أن الكون المتمدد قد بدأ منذ حوالى 15 مليار سنة من حالة غاية في الطاقة والكثافة والانضغاط.

Big Crunch **الانهيار الهائل**

إحدى فرضيات المستقبل للعالم والتي يتوقف فيها التمدد الحالي ثم ينعكس ويؤدي إلى انهيار كل من الفضاء والمادة معاً، أي عكس الانفجار الهائل Big Bang.

Uniform Vibration **الاهتزاز المنتظم (المتجانس)**

الحركة الشاملة للوتر String حيث يتحرك من دون حدوث تغير في شكله.

ATB **أوائل حروف الجملة "After the Bang"**

ما بعد الانفجار الهائل، وتستخدم عادة في الرجوع إلى الزمن المنقضي بعد الانفجار الهائل (نشأة الكون).

Brane **بران (غشاء)**

أي واحد من الأجسام الممتدة التي تنشأ من نظرية الأوتار String Theory. واحد - بران عبارة عن وتر String، واثنان - بران غشاء، وثلاثة - بران له ثلاثة أبعاد ممتدة، وهكذا. وعموماً، فإن P- بران له عدد P من الأبعاد الفضائية.

Proton **البروتون**

جسيمة لها شحنة موجبة، توجد في نواة الذرة Atom، وتتكون من ثلاثة كواركات Quarks (اثنان أعلى وواحد أسفل).

Dimension **بُعْد**

محور مستقل أو اتجاه مستقل في الفضاء أو الزمكان Spacetime. وللفضاء المألوف حولنا ثلاثة أبعاد (يسار - يمين، وخلف - أمام، وأعلى - أسفل) وللزمكان المألوف أربعة أبعاد (الثلاثة السابقة بالإضافة إلى محول الماضي - المستقبل). وتتطلب نظرية الأوتار الفائقة Superstring Theory أن يكون للعالم أبعاد فضائية إضافية.

Curled-Up Dimension **البعد المتجعد**

بعد فضائي Dimension ليس له امتداد فضائي ملحوظ، وهو بعد فضائي متجعد ومتغضن وملتف ذو حجم غاية في الضآلة، ولذلك يروغ من محاولات اكتشافه.

Extended Dimension **البعد الممتد**

بعد Dimension فضائي (وزمكاني Spacetime) كبير وواضح مباشرة، وهو البعد العادي المألوف لنا، عكس البعد المتجعد.

Boson **بوزون**

جسيمة أو نسق من اهتزازات الوتر، ويحتوي على عدد صحيح لكمية الحركة المغزلية Spin، وهو جسيمة مرسال نموذجية Messenger Particle.

Weak Gauge Boson **البوزون القياسي الضعيف**

أصغر حزمة في مجال القوة الضعيفة Weak Force Field وهي جسيمة مرسال Messenger Particle للقوة الضعيفة Weak Force وتسمى بوزونات W أو Z.

Z Boson **بوزون Z**

انظر البوزون القياسي الضعيف Weak Gauge Boson.

W Bosons **بوزونات W**

انظر البوزون القياسي الضعيف Wave Gauge Boson.

Photoelectric Effect **التأثير الكهروضوئي**

الظاهرة التي تنطلق فيها الإلكترونات Electrons من سطح فلزي إذا تعرض للضوء.

Quantum Fluctuation / Quantum Field Theory **التأرجحات الكمية**

السلوك المضطرب لنظام على المستوى المجهري بسبب مبدأ عدم التيقن Uncertainty Principle.

Tachyon **تاكيون**

جسيمة لها كتلة (مربع الكتلة) سالبة؛ ويؤدي ظهورها في نظرية ما عموماً إلى عدم الاستقرار.

Curvature **التحدب**

حيود جسم أو فضاء أو زمكان Spacetime من الشكل المستوي (المسطح) Flat وبذلك يحيد عن القواعد الهندسية التي صاغها إقليدس.

Phase Transition **التحول الطوري**

تطور نظام فيزيائي من طور إلى آخر.

Space-Tearing Flop Transition **التحول الفجائي الممزق للفضاء**

انظر التحول المفاجئ Flop Transition.

Conifold Transition **التحول المخروطي**

تطور الجزء الخاص بأشكال كالابي-ياو Calabi-Yau من الفضاء والذي فيه يتمزق نسيجه ثم يعاد إصلاحه، بطريقة متتابعة معقولة ومقبولة فيزيائياً ضمن إطار نظرية الأوتار String Theory، والتمزقات هنا أكثر عنفاً من التمزقات الموجودة في التحولات الانقلابية Flop Transition.

Flop Transition **التحول المفاجئ**

تطور الجزء من الفضاء الذي يشغله كالابي-ياو Calabi-Yau والذي يتمزق فيه نسيجه ثم يعيد إصلاح نفسه مؤدياً إلى نتائج فيزيائية هادئة ومقبولة في إطار نظرية الأوتار.

Topology-Changing Transition **تحولات مغيرة للطوبولوجيا**

تطور في النسيج الفضائي يتضمن تمزقات تغير من طوبولوجيا Topology الفضاء.

Primordial Nucleosynthesis **تخليق الأنوية البدائي**

إنتاج الأنوية الذرية الذي يحدث خلال الدقائق الثلاث الأولى بعد الانفجار الهائل Big Bang.

التردد **Frequency**

عدد الدورات الكاملة التي تصنعها الموجات في الثانية.

تسارع - عجلة **Acceleration**

التغير في سرعة أو اتجاه جسم، راجع كذلك Velocity (السرعة المتجهة).

التضخم، الكوسمولوجيا التضخمية **Inflation, Inflationary Cosmology**

تعديلات أدخلت على اللحظات المبكرة في الكوسمولوجيا القياسية للانفجار الهائل Big Bang يمر فيها الكون بطفرات قصيرة من التمدد الهائل.

التفرد **Singularity**

الموقع الذي فيه يعاني نسيج الفضاء أو الزمكان Spacetime من التمزق العنيف.

تقلص لورنس **Lorentz Contraction**

سمة تنبع من النسبية الخاصة Special Relativity يبدو فيها الجسم المتحرك اقصر في اتجاه الحركة.

تمدد الزمن (استطالة الزمن) **Time Dilation**

صفة تنبع من النسبية الخاصة Special Relativity، حيث يتباطأ سريان الزمن بالنسبة لراصد Observer متحرك.

تناظر **Symmetry**

خاصية من خواص النظام الفيزيائي التي لا تتغير عندما ينتقل النظام بشكل ما. فمثلاً، سطح الكرة متناظر منطقياً لأن مظهره لا يتغير عند الدوران.

التناظر الفائق **Supersymmetry**

مبدأ التناظر Symmetry الذي يربط خواص الجسيمات التي لها كمية من الأعداد الصحيحة للحركة المغزلية Spin (بوزونات Bosons) مع تلك الجسيمات التي لها كمية من نصف الأعداد الصحيحة (الفردية) للحركة المغزلية Spin (فيرميونات Fermions).

تناظر القوة القوية **Strong Force Symmetry**

التناظر القياسي Gauge Symmetry الذي يكمن في أساس القوة القوية Strong Force، المصاحبة لعدم التغير في نظام فيزيائي يعاني إزاحة في شحنة اللون للكواركات Quarks.

التناظر القياسي **Gauge Symmetry**

مبدأ التناظر Symmetry الذي يكمن في أساس الوصف الكمي للقوى اللاجاذبية الثلاث، ويتضمن التناظر عدم التغير في نظام فيزيائي في حالة الإزاحات المختلفة في قيم شحنات القوة Force Charges، وهي الإزاحات التي تتغير من مكان لآخر ومن لحظة لأخرى.

التناظر القياسي الضعيف **Weak Gauge Symmetry**

التناظر القياسي Gauge Symmetry الكامن في القوة الضعيفة Weak Force.

التناظر الكهرومغناطيسي العياري **Electromagnetic Gauge Symmetry**

التناظر العياري Gauge Symmetry الذي يكمن في الكهروديناميكية الكمية Quantum Electrodynamics.

تناظر المرآة **Mirror Symmetry**

في سياق نظرية الأوتار String Theory، يبين التناظر Symmetry أن شكلين مختلفين من أشكال كالابي-ياو Calabi-Yau Shapes، يعرفان باسم زوج صورة مرآة، لهما نفس الفيزياء، عند تطبيقهما على الأبعاد المتجعدة Curled-Up Dimensions لنظرية الأوتار String Theory.

توتر (شد) بلانك **Planck Tension**

وقيمته طن، وهو توتر وتر String نموذجي في نظرية الأوتار String Theory.

التوحد العظيم **Grand Unification**

فصيل من النظريات يُدمج القوى اللاجاذبية الثلاث في إطار نظري منفرد.

ثابت الازدواج **Coupling Constant**

انظر ثابت ازدواج الوتر String Coupling Constant.

ثابت ازدواج الوتر **String Coupling Constant**

عدد (موجب) يحكم ترجيح انشطار الوتر String إلى وترين، أو ترجيح اتحاد وترين في وتر واحد - العملية الأساسية في نظرية الأوتار String Theory. ولكل نظرية من نظريات الأوتار String Theory ثابت ازدواج الوتر الخاص بها، ولا بد أن تتحدد قيمة هذا الثابت بمعادلة، وحاليا تعتبر مثل هذه المعادلات غير مفهومة جيداً لنحصل منها على معلومات مفيدة. وتبين قيم ثابت الازدواج الأقل من واحد أن الطرق الاضطرابية Perturbative Methods صحيحة.

ثابت بلانك **Planck's Constant**

يرمز له بالرمز $\hbar$، وهو مؤشر أساسي في ميكانيكا الكم Quantum Mechanics، وهو يحدد قيمة الوحدات التي تكوّن الطاقة، والكتلة، والحركة المغزلية Spin، الخ، والتي يتكون منها العالم الميكروسكوبي. وقيمة هذا الثابت غرام-سم/ ثانية.

الثابت الكوسمولوجي (الكوني) **Cosmological Constant**

تعديل للمعادلات الأصلية في النسبية العامة General Relativity، يسمح بأن يكون الكون ستاتيكياً، وكان يفسر بأنه ثابت كثافة الطاقة في الفراغ.

الثقب الأسود **Black-Hole**

جسم يقتنص مجال جاذبيته الهائل أي شيء يقترب منه، حتى الضوء (إلى مسافة أقرب من أفق الحدث Event Horizon للثقب الأسود).

الثقب الأسود عديم الكتلة **Massless Black Hole**

نوع معين من الثقوب السوداء Black Holes في نظرية الأوتار كان له كتلة كبيرة في الأصل ثم أخذت تتناقص كلما تقلصت قطعة من أشكال كالابي-ياو Calabi-Yau. وعندما يتقلص جزء الفضاء حتى يصير نقطة، لا تتبقى كتلة - أي يصبح الثقب الأسود بلا كتلة. وفي هذه الحالة لا تظهر الخواص العادية للثقب الأسود مثل أفق الحدث Event Horizon.

الثقب متعدد الأبعاد **Multidimensional Hole**

تعميم للثقوب الموجودة في منتصف الدونت (الكعكة) على الصور ذات الأبعاد الأكثر.

الثقوب السوداء القصوى **Extremal Black Holes**

الثقوب السوداء Black Holes ذات شحنة القوة Force Charge القصوى التي يمكن أن تحملها كتلة كلية.

ثلاثة بران (غشاء) **Three-Brane**

انظر بران (غشاء) Brane.

ثنائي، ثنائية، تناظرات الثنائية **Dual, Duality, Duality Symmetries**

الوضع الذي تبدو فيه نظريتان أو أكثر وكأنهما مختلفتان (مختلفة) تماماً، ومع ذلك فهما يعطيان نتائج فيزيائية واحدة (النتائج الفيزيائية نفسها).

ثنائية قوي - ضعيف **Strong-Weak Duality**

الوضع الذي تكون فيه نظرية قوية الازدواج Strongly Coupled Theory ثنائي - متطابق فيزيائياً - مع نظرية أخرى ضعيفة الازدواج Weakly Coupled.

ثنائية الموجة - الجسيمة **Wave-Particle Duality**

السمة الأساسية لميكانيكا الكم Quantum Mechanics التي يبديها الجسم في شكل خواص تشبه الموجات وخواص تشبه الجسيمات.

ثورة الأوتار الفائقة الثانية **Second Superstring Theory**

فترة أثناء تطور نظرية الأوتار String Theory بدأت حوالى العام 1995 حيث بدأت بعض السمات اللااضطرابية Nonperturbative تصبح مفهومة.

الجاذبية الفائقة **Supergravity**

طراز من نظريات الجسيمات - النقاط تجمع بين النسبية العامة General Relativity والتناظر الفائق Supersymmetry.

الجاذبية الفائقة ذات الأحد عشر بعداً **Eleven-Dimensional Gravity**

نظرية الأبعاد الأكثر للجاذبية الفائقة Supergravity، التي تطورت في سبعينيات القرن العشرين، وأهملت جزءاً من نظرية الأوتار String Theory اتضحت أهميته في ما بعد.

Higher-Dimensional Superstring **الجاذبية الفائقة للأبعاد الأعلى**

فصيل من نظريات الجاذبية الفائقة Supergravity للأبعاد الزمكانية الأكثر من أربعة Spacetime.

Quantum gravity **الجاذبية الكمية**

نظرية تدمج بنجاح ميكانيكا الكم Quantum Mechanics والنسبية العامة General Relativity، ومن الممكن أن تتضمن تعديلات على إحداهما أو على كليهما. ونظرية الأوتار String Theory مثال على نظرية في الجاذبية الكمية.

Wormhole **جحر الدودة**

منطقة من الفضاء لها شكل الأنبوبة تصل بين منطقتين في الكون.

Virtual Particles **الجسيمات الافتراضية**

الجسيمات التي تنشأ لحظياً من الفراغ، وهي تتواجد على طاقة مستدانة، في توافق مع مبدأ عدم التيقن Uncertainty Principle، ثم تتلاشى بسرعة، وبذلك تدفع دين الطاقة.

Messenger Particle **الجسيمة المرسال**

أصغر حزمة في مجال القوة Force Field، وهي الناقل المجهري للقوة.

Antiparticle **الجسيمة المضادة**

جسيمة من المادة المضادة.

Sum-Over-Paths **جمع المسارات**

صياغة لميكانيكا الكم Quantum Mechanics التي نتخيل فيها الجسيمات تنتقل من نقطة لأخرى على طول كل المسارات المحتملة بينهما.

Product **حاصل الضرب**

نتيجة ضرب رقمين.

BPS States **حالات BPS**

الأشكال الواردة في نظرية التناظر الفائق Supersymmetric والتي تتحدد خواصها بدقة من أصل التناظر Symmetry.

Quantum Determinism **الحتمية الكمية**

خاصية من خواص ميكانيكا الكم Quantum Mechanics تنص على أن معرفة الحالة الكمية لنظام في لحظة ما معرفة تامة تحدد حالته الكمية في المستقبل والماضي. غير أن معرفة الحالة الكمية تحدد فقط احتمالية حدوث مستقبل معين.

Laplacian Determinism **حتمية لابلاس**

مفهوم عن عمل العالم مثل الساعة حيث المعلومات الكاملة عن حالة العالم في لحظة ما تتحدد في المستقبل والماضي.

Spin **الحركة المغزلية**

صورة كمية لمفهوم مألوف له نفس الاسم، وللجسيمات كميات ذاتية من الحركة المغزلية لها قيمة عدد صحيح أو نصف عدد صحيح (مضاعفات لثابت بلانك Plank's Constant) لا تتغير أبداً.

Schwarzschild Solution **حل شوارتزتشايلد**

حل معادلات النسبية العامة General Relativity في حالة التوزيع الكروي للمادة؛ وأحد تطبيقات هذا الحل هو إمكانية وجود الثقوب السوداء Black Holes.

Cosmic Microwave Background Radiation **الخلفية الإشعاعية الميكروية الكونية**

الإشعاعات الميكروية التي تغرق الكون، والتي نتجت أثناء الانفجار الهائل Big Bang وأخذت تقل كثافتها وتبرد بتمدد الكون.

Quantum Claustrophobia **الخوف من الأماكن المغلقة الكمي (الرهاب الكمي)**

راجع التأرجحات الكمية Quantum Fluctuations.

Wave Function **الدالة الموجية**

الموجات المحتملة التي تقوم عليها ميكانيكا الكم.

Multi-Doughnut, Multi-Handled Doughnut **الدونت المتعددة، الدونت متعددة الثقوب**

تعميم لشكل الدونت (طارة) التي لها أكثر من ثقب.

Thermodynamics **الديناميكا الحرارية**

قوانين تطورت في القرن التاسع عشر لتصف سمات الحرارة والشغل والطاقة والأنتروبية Entropy وتطوراتها المتبادلة في نظام فيزيائي.

Atom **ذرّة**

لبنة بناء المادة الأساسية، وتتكون من نواة (مكونة من بروتونات ونيوترونات) وسرب من الإلكترونات يدور حولها.

Foam **الرغوة**

انظر الرغوة الزمكانية Spacetime Foam.

Spacetime Foam **الرغوة الزمكانية**

الخاصية الرغوية المنبعجة الملتوية لنسيج الزمكان Spacetime على المستوى الميكروي الفائق Ultramicroscopic وفقاً لمنظور متفق عليه للجسيمة النقطة. وأحد الأسباب الرئيسية لعدم التوافق بين ميكانيكا الكم Quantum Mechanics والنسبية العامة General Relativity قبل ظهور نظرية الأوتار String Theory.

Quantum Foam **الرغوة الكمية**

انظر الرغوة الزمكانية Spacetime Foam.

Resonance **الرنين**

إحدى الحالات الطبيعية للتردد في نظام فيزيائي.

Spacetime **الزمكان**

وحدة بين الزمان والمكان نبعت في الأصل من النسبية الخاصة Special Relativity. ويمكن اعتبارها "النسيج" الذي صنع منه العالم، ويشكل الساحة الديناميكية التي تدور عليها أحداث العالم.

Planck Time **زمن بلانك**

حوالي ثانية. وهو الزمن الذي عنده وصل حجم الكون بالتقريب إلى طول بلانك Planck Length، أو بعبارة أكثر دقة، الزمن الذي يستغرقه الضوء لينتقل مسافة طول بلانك Planck Length.

Light Clock **الساعة الضوئية**

ساعة خيالية تقيس الزمن بإحصاء عدد الترددات الكاملة لفوتون Photon مفرد بين مرآتين.

Velocity **السرعة الموجهة**

سرعة واتجاه الجسم أثناء حركته.

Sphere **سطح الكرة**

السطح الخارجي لكرة. سطح كرة ثلاثية الأبعاد مألوفة وله بعدان (ويمكن تمييزهما بأرقام مثل "خطوط العرض" و"خطوط الطول" كما هو الحال على سطح الأرض). ومفهوم سطح الكرة ينطبق بصورة عامة على الكرات وبالتالي على أسطحها في أي عدد من الأبعاد. وسطح الكرة ذو البعد الواحد اسم خيالي للدائرة أما سطح الكرة عديم البعد فهو نقطتان (كما هو مبين في متن الكتاب). ومن الصعب تخيل سطح كرة ذي ثلاثة أبعاد لأنه سطح كرة رباعية الأبعاد.

Three-Dimensional Sphere **سطح كروي ثلاثي الأبعاد**

انظر سطح الكرة Sphere.

Two-Dimensional Sphere **سطح كروي ثنائي الأبعاد**

انظر سطح الكرة Sphere.

Zero-Dimensional Sphere **سطح كروي لا بعد له**

انظر سطح الكرة Sphere.

Amplitude **سعة الموجة**

أقصى ارتفاع لقمة موجة أو أقصى عمق لقاع موجة.

Charge **شحنة**

انظر شحنة القوة Force Charge.

Force Charge **شحنة القوة**

خاصية للجسيمات تحدد كيفية رد فعلها تجاه قوة معينة. فمثلاً تحدد الشحنة الكهربية للجسيمة كيفية رد فعلها تجاه القوة الكهرومغناطيسية Electromagnetic Force.

Superpartners **الشركاء (الرفاق) الفائقون**

الجسيمات التي تختلف حركتها المغزلية Spin بمقدار 2/1 وحدة، والتي تتزاوج بواسطة التناظر الفائق Supersymmetry.

Absolute Zero **الصفر المطلق**

أصغر درجة حرارة ممكنة، وهي حوالى -273 درجة سلزية، أو صفر بمقياس كلفن.

Torus **طارة**

سطح ثنائي الأبعاد للدونت.

Winding Energy **طاقة الالتفاف**

الطاقة المتضمنة في الوتر String الذي يلتف حول البعد Dimension الدائري في الفضاء.

Planck Energy **طاقة بلانك**

تقدر بحوالى ألف كيلووات ساعة. وهي الطاقة اللازمة لسبر المسافات الصغيرة في طول بلانك Planck Length. وهي الطاقة النموذجية للوتر المتذبذب String في نظرية الأوتار String Theory.

Topology **طوبولوجيا**

تقسيم الأشكال في مجموعات يمكن تحويرها بعضها بعض من دون عنف أو تمزق في بنيتهما بأي شكل.

Phase **طور (صنف)**

عند استخدام هذا اللفظ للمواد فإنه يصف الحالة الممكنة لها: طور جامد أو سائل أو غاز. وهو يشير عموماً للأوصاف الممكنة لنظام فيزيائي كخواص يعتمد عليها النظام (درجة الحرارة وقيمة ثابت ازدواج الوتر String Coupling Constant وشكل الزمكان Spacetime، وهكذا) عند تغيرها.

Planck Length **طول بلانك**

حوالى سنتيمتر، وهو الطول الذي تصبح تحته التأرجحات الكمية Quantum Fluctuations في نسيج الزمكان هائلة. وهو الطول النموذجي للوتر String في نظرية الأوتار String Theory.

Wavelength **طول الموجة**

المسافة بين قمتين متتاليتين أو قاعين متتاليين للموجات.

Initial Conditions **الظروف الأصلية**

البيانات التي تصف حالة البداية لنظام فيزيائي.

Multiverse **عالم متعدد**

تكبير خيالي للكون حيث يمثل عالمنا واحداً فقط بين أعداد كثيرة لعوالم منفصلة ومتميزة.

Families **العائلات**

ترتيب لجسيمات المادة في ثلاث مجموعات تعرف كل مجموعة منها باسم عائلة. وتختلف الجسيمات في كل عائلة عن العائلة السابقة عليها بكونها أثقل، لكنها تحمل نفس الشحنة الكهربية وشحنات القوة Force Charges النووية.

Winding Number **عدد الالتفاف**

عدد المرات التي يلتف فيها الوتر String حول بعد فضائي دائري.

Vibration Number **عدد الاهتزاز**

رقم صحيح يعبر عن الطاقة في الاهتزاز المنتظم Uniform Vibration للوتر String، الطاقة في الحركة الشاملة في مقابل تلك المصاحبة للتغير في الشكل.

One-Loop Process **عملية حلقة واحدة (أنشوطة واحدة)**

المساهمة في حسابات النظرية الاضطرابية Perturbation Theory حيث تتضمن الحسابات زوجاً من الأوتار String (أو الجسيمات في نظرية الجسيمة النقطة).

Graviton **غرافيتون**

أصغر حزمة في مجال قوة الجاذبية Gravitational Force Field، وهي جسيمة مرسال Messenger Particle لقوة الجاذبية.

World-Sheet **الغشاء (الملاءة) العالمية**

سطح ثنائي الأبعاد يمسحه الوتر أثناء حركته.

Gluon **غليون**

أصغر حزمة في مجال القوة القوية Strong Force Field، وهي جسيمة مرسال messenger Particle للقوة القوية.

Calabi-Yau Space, Calabi-Yau Shape **فراغ كالابي-ياو، شكل كالابي-ياو**

فراغ (شكل) يمكن أن تتجعد فيه الأبعاد الفضائية الإضافية التي تتطلبها نظرية الأوتار String Theory، وتتفق مع معادلات النظرية.

Photon **الفوتون**

أصغر حزمة في مجال القوة الكهرومغناطيسية Electromagnetic Force Field، وهو جسيمة مرسال Messenger Particle للقوة الكهرومغناطيسية Electromagnetic Force، وهو اصغر حزمة في الضوء.

Fermion **الفيرميون**

جسيمة أو نسخة اهتزاز للوتر String بكمية حركة مغزلية Spin نصف عدد فردي، وهي جسيمة مادة نموذجية.

Second Law of Thermodynamics **القانون الثاني للديناميكا الحرارية**

القانون الذي يقول أن الأنتروبية Entropy الكلية تزداد دائماً.

Neuton's Laws of Motion **قوانين الحركة لنيوتن**

القوانين التي تصف حركة الأجسام وتقوم على مفهوم أن المكان والزمان مطلقان وغير قابلين للتغير، وقد ظلت هذه القوانين صامدة حتى اكتشاف آينشتاين للنسبية الخاصة Special Relativity.

Gravitational Force **قوة الجاذبية**

أضعف القوى الأربع الأساسية في الطبيعة. وقد وصفتها نظرية نيوتن العالمية للجاذبية ثم النسبية العامة General Relativity لآينشتاين.

Weak Force, Weak Nuclear Force **القوة الضعيفة، القوة النووية الضعيفة**

إحدى القوى الأساسية الأربع، وأكثر ما تعرف كوسيط في التحلل الإشعاعي.

Strong Force, Strong Nuclear Force **القوة القوية، القوة النووية القوية**

أقوى القوى الأساسية الأربع، وهي المسؤولة عن إبقاء الكواركات Quarks موصدة داخل البروتونات Protons والنيوترونات Neutrons وعن إبقاء البروتونات والنيوترونات داخل النواة الذرية.

Electromagnetic Force **القوة الكهرومغناطيسية**

واحدة من القوى الأساسية الأربع، وهي اتحاد القوى الكهربية والمغناطيسية.

Planck Mass **كتلة بلانك**

حوالى 10 ملايين المليارات من كتلة البروتون، حوالى جزء من مائة جزء من جزء من الألف من الجرام، حوالى كتلة حبة صغيرة من الغبار، وهى الكتلة النموذجية المكافئة لوتر يهتز فى نظرية الأوتار.

Quantum Chromodynamics (QCD) **الكروموديناميكية الكمية**

نظرية مجال الكم النسبي Relativistic Quantum Field Theory للقوة القوية Strong Force والكواركات Quarks، المتضمنة في النسبية الخاصة Special Relativity.

Symmetry Breaking **كسر التناظر**

إنقاص كمية التناظر Symmetry التي يبدو أن النظام يملكها، وهو عادة يرافق التحول الطوري Phase Transition.

Kelvin **كلفن**

مقياس لدرجة الحرارة تبدأ فيه درجة الحرارة من الصفر المطلق Absolute Zero.

Quanta **كم - كوانتا**

اصغر وحدة فيزيائية يمكن أن ينقسم إليها أي شيء تبعاً لقوانين ميكانيكا الكم. فمثلاً الفوتونات Photons هي كوانتا (ت) المجال الكهرومغناطيسي.

Quantum electrodynamics (QED) **• الكهروديناميكية الكمية**

نظرية مجال الكم النسبي Relativistic Quantum Field Theory للقوة الكهرومغناطيسية Electromagnetic Force والإلكترونات Electrons المتضمنة في النسبية الخاصة Special relativity.

Quark **كوارك**

جسيمة تؤثر فيها القوة القوية. وتتواجد الكواركات على ستة أنواع (أعلى، وأسفل، وأنيق، وغريب، وقمة، وقاع) وثلاثة "ألوان" (الأحمر والأخضر والأزرق).

Chiral, Chirality **كيرال، كيرالية (الكَفِّية)**

إحدى سمات فيزياء الجسيمات الأساسية والتي تميز صفة اليد اليمنى عن اليد اليسرى (الكف)، وهي تبين أن الكون ليس كله متناسقاً يمين - يسار.

Nonperturbative **اللاإضطرابي**

سمة من سمات نظرية ما لا تعتمد صحتها على التقريب، الحسابات الاضطرابية Perturbative؛ السمة الدقيقة لنظرية ما.

Infinities **اللانهائيات**

إجابة غير منطقية تنبثق من الحسابات التي تتضمن النسبية العامة General Relativity وميكانيكا الكم Quantum Mechanics في إطار الجسيمات - النقاط.

Antimatter **المادة المضادة**

المادة التي لها نفس خواص الجاذبية مثل المادة العادية، لكن لها شحنة كهربية مضادة وكذلك شحنات قوة نووية مضادة.

Macroscopic **ماكروي**

تشير إلى المقاييس التي نتعامل معها في حياتنا اليومية وهي كبيرة وبالتقريب عكس ميكروية.

Anthropic Principle **المبدأ البشري**

العقيدة التي تفسر سبب ما هي عليه خواص الكون التي نراها، بأنه لو كانت خواصه مختلفة فمن الأرجح أن الحياة لن تنشأ، وهكذا لن نكون هنا لنلاحظ هذا التغير.

Principle of Equivalence/Equivalence Principle **مبدأ التكافؤ**

المبدأ المحوري (الأساسي) في النسبية العامة General Relativity، الذي يعلن أنه لا يمكن التفرقة بين الحركة المتسارعة والتواجد في مجال جاذبية (في مناطق صغيرة للملاحظة). وهو يعمم مبدأ النسبية Principle of Relativity بأن يبين أن كل الراصدين، بصرف النظر عن حالة حركتهم يمكن أن يزعم كل واحد منهم أنه في حالة سكون طالما اعترفوا بوجود مجال

جاذبية مناسب.

مبدأ عدم التيقن **Uncertainty principle**

مبدأ ميكانيكا الكم Quantum Mechanics الذي اكتشفه هيزنبرغ، والذي ينص على أن هناك سمات للكون مثل الموقع والسرعة الموجهة Velocity للجسيمة لا يمكن معرفتهما بدقة تامة. وتزداد درجة عدم التيقن أكثر وأكثر كلما صغرت أكثر وأكثر المسافة والزمن اللذان نتعامل معهما. فتتأرجح المجالات وتقفز الجسيمات بين جميع القيم الممكنة التي تناسب عدم التيقن الكمي. ويعني ذلك أن العالم المجهري يضطرب بجنون في بحر عاصف من التأرجحات الكمية Quantum Fluctuations.

مبدأ النسبية **Principle of Relativity**

المبدأ المحوري (الأساسي) في النسبية الخاصة Special Relativity والذي ينص على أن كل الراصدين الذين يتحركون بسرعة ثابتة Velocity Observers يتعرضون لنفس مجموعة القوانين الفيزيائية، وبذلك فإن لكل واحد يتحرك بسرعة ثابتة الحق في الادعاء بأنه ساكن لا يتحرك. وقد تم تعميم هذا المبدأ في مبدأ التكافؤ Principle of Equivalence.

متمايز طوبولوجياً **Topologically Distinct**

شكلان لا يمكن أن يتحولا أحدهما للآخر من دون حدوث تمزق لبنيتهما بشكل ما.

المجال، مجال القوة **Field, Force Field**

هو الوسيلة التي تنقل بها القوة تأثيرها من منظور ماكروي Macroscopic، وهو يتصف بمجموعة من الأعداد عند كل نقطة في الفضاء تعكس شدة واتجاه القوة في هذه النقطة.

المجال الكهرومغناطيسي **Electromagnetic Field**

مجال قوة القوة الكهرومغناطيسية Electromagnetic Force، ويتكون من خطوط قوى كهربية ومغناطيسية في كل نقطة من الفضاء.

مستوى، سطح **Flat**

تبعاً لقواعد الهندسة الإقليدية، هو شكل مثل سطح منضدة أملس تماماً وله نفس التعميمات للأبعاد الأكبر.

المشاهد، الملاحظ، الراصد **Observer**

شخص مثالي أو جهاز، عادة خيالي، يقيس الخواص في نظام فيزيائي.

معادلة شرودنغر **Schrodinger Equation**

المعادلة التي تحكم تطور موجات الاحتمالات في ميكانيكا الكم Quantum Mechanics.

معادلة كلاين-غوردون **Klein-Gordon Equation**

معادلة أساسية في نظرية مجال الكم النسبي Relativistic Quantum Field Theory.

معجل **Accelerator**

انظر معجل الجسيمات Particle Accelerator.

Particle Accelerator **معجل الجسيمات**

جهاز (ماكينة) لدفع الجسيمات لتقترب سرعتها من سرعة الضوء ثم يقذفها بعضها على بعض وذلك بغرض دراسة تركيب المادة.

Horizon Problem **معضلة الأفق**

أحجية كوسمولوجية تترافق مع حقيقة أن المناطق البعيدة بعضها عن بعض بمسافات شاسعة في الكون لها مع ذلك تقريباً صفات واحدة مثل درجة الحرارة. وتقدم الكوسمولوجيا التضخمية الحل Inflationary Cosmology.

Reciprocal **المعكوس**

معكوس الرقم، فمثلاً معكوس 3 هو $\frac{1}{3}$ ومعكوس $\frac{1}{2}$ هو 2.

Perturbative Approach, Perturbative Method **المنطلق الاضطرابي، الطريقة الاضطرابية**

انظر النظرية الاضطرابية Perturbative Theory.

Electromagnetic Wave **الموجة الكهرومغناطيسية**

اضطراب كالموجة في المجال الكهرومغناطيسي Electromagnetic Field وتنتقل كل هذه الموجات بسرعة الضوء. ومن أمثلتها الضوء المرئي وأشعة X (الأشعة السينية) والموجات الميكروية والأشعة تحت الحمراء.

Quantum Mechanics **ميكانيكا الكم**

إطار من القوانين التي تحكم العالم، حيث تصبح خواصها غير المألوفة مثل عدم التيقن Uncertainty والتأرجحات الكمية Quantum Fluctuations وثنائية الموجة-الجسيمة Wave-Particle Duality تصبح الأكثر وضوحا في المستوى المجهري للذرات Atoms والجسيمات تحت النووية.

Special Relativity **النسبية الخاصة**

قوانين آينشتاين عن المكان والزمان في غياب الجاذبية (انظر كذلك النسبية العامة General Relativity).

Vibration Pattern **نسق الاهتزاز**

العدد الدقيق للقمم والقيعان والسعة أثناء تذبذب الوتر String.

Interference Pattern **نسق التداخل**

نسق الموجات الذي ينبثق من تداخل وخلط الموجات الصادرة من مصادر مختلفة.

Oscillatory Pattern **النسق التذبذبي**

انظر نسق الاهتزاز Vibrating Pattern.

Perturbative Theory **النظرية الاضطرابية**

إطار لتبسيط المشاكل الصعبة بإيجاد حل تقريبي يجري تنقيحه بعد ذلك كلما أدخلنا مزيداً

من التفاصيل، التي كانت مهملة من قبل، ومتضمنة تناظرياً.

نظرية الأوتار **String Theory**

نظرية موحدة Unified Theory للكون، تفترض أن المكونات الأساسية للطبيعة ليست جسيمات نقاط صفرية الأبعاد، لكنها فتائل أحادية الأبعاد تسمى أوتار Strings. ونظرية الأوتار توحد بتجانس ميكانيكا الكم Quantum Mechanics والنسبية العامة General Relativity وهي القوانين المعروفة من السابق للأشياء الصغيرة والأشياء الكبيرة والتي بدون نظرية الأوتار لا تتفق مع بعضها. وهي اختصار لاسم نظرية الأوتار الفائقة Superstring Theory.

نظرية الأوتار البوزونية **Bosonic String Theory**

أول نظرية أوتار عرفت؛ وتتضمن أنساقا اهتزازية Vibrational Patterns كلها بوزونات Bosons.

نظرية الأوتار من النوع I **Type I String Theory**

واحدة من النظريات الخمس للأوتار الفائقة Superstring Theories، وتتضمن كلاً من الأوتار المفتوحة Open والمغلقة Closed Strings.

نظرية الأوتار من النوع IIA **Type IIA String Theory**

واحدة من النظريات الخمس للأوتار الفائقة Superstring Theories، وتتضمن الأوتار المغلقة Closed Strings التي لها أنساق اهتزاز Viberational Patterns تناظر يمين-يسار.

نظرية الأوتار من النوع IIB **Type IIB String Theory**

واحدة من النظريات الخمس للأوتار الفائقة Superstring Theories، وتتضمن الأوتار المغلقة Closed Strings التي لها أنساق اهتزاز Viberational Patterns لعدم التناظر يمين-يسار.

نظرية الأوتار هيتيروتيك-E **Heterotic-E String Theory**

(نظرية الأوتار هيتيروتيك **(Heterotic $E_{8x}E_8$ String Theory)**

إحدى النظريات الخمس للأوتار الفائقة Superstring Theory وتتضمن أوتاراً مغلقة تشابه حركة اهتزازها اليمنى تلك في الأوتار من النوع Type II String، بينما تتضمن حركة اهتزازها اليسرى تلك الاهتزازات الموجودة في الأوتار البوزونية Bosonic String. وتختلف هذه النظرية عن نظرية الأوتار هيتيروتيك- Heterotic-O String Theory O اختلافاً هاماً لكنه غير واضح.

نظرية الأوتار هيتيروتيك-O **Heterotic-O String Theory**

(نظرية الأوتار هيتيروتيك (O(32) **(Heterotic O(32) String Theory)**

إحدى النظريات الخمس للأوتار الفائقة Superstring Theory، وتتضمن أوتاراً مغلقة تشابه حركة اهتزازاتها تلك الموجودة في أوتار النوع Type II String وتتضمن حركة اهتزازاتها اليسرى تلك الاهتزازات الموجودة في الأوتار البوزونية Bosonic String، وتختلف هذه النظرية عن نظرية الأوتار هيتيروتيك-E اختلافاً هاماً لكنه غير واضح.

Kaluza-Klein Theory **نظرية كالوزا - كلاين**

فصيل من النظريات يتضمن أبعاداً فضائية إضافية متجعدة Curled-Up Dimensions مع ميكانيكا الكم Quantum Mechanics.

T.O.E. (Theory of Everything) **نظرية كل شيء**

نظرية في ميكانيكا الكم (نظرة كمية) تشمل كل القوة وكل المادة.

Electroweak Theory **النظرية الكهربية الضعيفة**

نظرية مجال الكم النسبي التي تصف القوة الضعيفة Weak Force والقوة الكهرومغناطيسية Electromagnetic Force في إطار موحد.

Quantum Electroweak Theory **نظرية الكهربية الكمية الضعيفة**

انظر نظرية مجال الكم النسبي Relativistic Quantum Field Theory.

Unified Theory, Unified Field Theory **النظرية الموحدة، نظرية المجال الموحد**

أية نظرية تصف كل القوى الأربع وكل المادة في إطار واحد يضم الجميع.

Maxwell's Theory, Maxwell's Electromagnetic Theory **نظرية ماكسويل، النظرية الكهرومغناطيسية لماكسويل**

النظرية التي توحد الكهرباء والمغناطيسية وهي تقوم على مفهوم المجال الكهرومغناطيسي Electromagnetic Field الذي أدخله ماكسويل في ثمانينيات القرن التاسع عشر، ويبين أن الضوء المرئي مثال للموجات الكهرومغناطيسية Electromagnetic Wave.

Supersymmetric Quantum Field Theory **نظرية مجال الكم للتناظر الفائق**

نظرية مجال الكم Quantum Field Theory المتضمنة للتناظر الفائق Super Symmetry.

Relativistic Quantum Field Theory **نظرية مجال الكم النسبي**

نظرية في ميكانيكا الكم عن المجالات مثل المجال الكهرومغناطيسي Electromagnetic Field المتضمن في النسبية الخاصة Special Relativity.

Newton's Universal Theory of Gravity **نظرية نيوتن العالمية للجاذبية**

نظرية الجاذبية التي تزعم أن قوة التجاذب بين جسمين تتناسب مع حاصل ضرب كتلتيهما وتتناسب عكسياً مع مربع المسافة بينهما. وقد أزاحتها وحلت محلها النسبية العامة General Relativity لآينشتاين.

M- Theory **نظرية -M**

النظرية التي تنبثق من الثورة الثانية للأوتار الفائقة Second Superstring Revolution والتي توحد النظريات الخمس السابقة في إطار واحد شامل. ويبدو أن نظرية -M تشتمل على أحد عشر بعداً زمكانياً Spacetime Dimensions، على الرغم من أن الكثير من خواصها التفصيلية غير مفهوم حتى الآن.

Winding Mode **نمط الالتفاف**

هيئة الوتر String الذي يلتف حول بعد Dimension فضائي دائري.

Vibrational Mode **نمط الاهتزاز**

انظر نسق الاهتزاز Vibration Pattern.

String Mode **نمط الوتر**

هيئة ممكنة (نسق اهتزازي Vibrational Pattern، هيئة لفافة-لولبية Winding Configuration) يمكن للوتر String أن يتخذها.

Supersymmetric Standard Model **النموذج القياسي فائق التناظر**

تصميم للنموذج القياسي لفيزياء الجسيمات Standard Model of Particle Physics لتتضمن التناظر الفائق Supersymmetry، تتطلب مضاعفة أنواع الجسيمات الأولية المعروفة.

Standard Model of Particle Physics, **النموذج القياسي لفيزياء الجسيمات؛**

Standard Model, Standard Theory **النموذج القياسي؛ النظرية القياسية**

نظرية ناجحة بشكل كبير للقوى الثلاث اللاجاذبية وتأثيراتها في المادة. وهي اتحاد بين الكروموديناميكا الكمية Quantum Chromodynamics والنظرية الكهربية الضعيفة Electroweak Theory.

Standard Model of Cosmology **النموذج القياسي للكوسمولوجيا**

نظرية الانفجار الهائل Big Bang مع مفهوم القوى الثلاث اللا جاذبية كما يوجزها النموذج القياسي لفيزياء الجسيمات Standard Model of Particle Physics.

Nucleus **نواة**

لب الذرة Atom الذي يتكون من بروتونات Protons ونيوترونات Neutrons.

Neutron **النيوترون**

جسيمة عديمة الشحنة، توجد في نواة الذرة Atom وتتكون من ثلاثة كواركات Quarks (اثنان أسفل وواحد أعلى).

Neutrino **النيوترينو**

جسيمة عديمة الشحنة، توجد فقط في القوة الضعيفة Weak Force.

Smooth, Smooth Space **الهادئ، الفضاء الهادئ**

منطقة فضائية فيها النسيج الفضائي مستوي (السطح) أو محدب بنعومة ولا يحتوي على تمزقات أو تجعدات من أي نوع.

Riemannian Geometry **هندسة ريمان**

إطار رياضي لوصف الأشكال المحدبة لأي بعد. وهي تلعب دوراً محورياً في وصف الزمكان Spacetime في النسبية العامة General Relativity.

Quantum Geometry **الهندسة الكمية**

تعديل على هندسة ريمان Riemannian Geometry مطلوب لوصف فيزياء الفضاء على المقياس المجهري الفائق Ultramicroscopic حيث تصبح التأثيرات الكمية هامة.

String **الوتر**

جسم أساسي ذو بعد واحد هو المكون الأساسى في نظرية الأوتار String Theory.

Open String **الوتر المفتوح**

نوع من الأوتار String له طرفان حران.

Closed String **وتر مغلق**

نوع من الأوتار String على شكل أنشوطة أو حلقة.

ثبت المصطلحات

Dimensions	أبعاد
Lineland	الأرض الخطية
Virtual String Pairs	أزواج الأوتار المفترضة
Spheres	أسطح الكرات (مكورة)
X Rays	أشعة X (السينية)
Cosmic Rays	الأشعة الكونية
Infrared Radiation	الأشعة تحت الحمراء
Event Horizon	أفق الحدث
Entropy	الأنتروبية
Black Hole Entropy	أنتروبية الثقب الأسود
High Entropy, Low Entropy	إنتروبية مرتفعة، وإنتروبية منخفضة
Interference Patterns	أنساق التداخل
Resonance Patterns	أنساق رنينية
Trinary Star Systems	أنظمة النجوم الثلاثية
Heavy String Modes	أنماط الأوتار الثقيلة
Light String Modes	أنماط الأوتار الخفيفة
Nuclei, of Atoms	أنوية الذرات
Strings	الأوتار
Antistrings	الأوتار المضادة
Wound Strings/wrapped strings	الأوتار الملتفة
Unwrapped Strings	الأوتار غير الملتفة
Two-Branes	اثنان بران (غشاء ثنائي)
Probability	الاحتمال
Reductionism	الاختزالية
Winding Mode	اسلوب (شكل) الدوران (الالتفاف)
Spacetime, Warping of	اعوجاج الزمكان
Fusion	الاندماج (الانصهار)
Big Bang	الانفجار الهائل (بداية الكون)
Big Crunch	الانهيار الهائل

Ordinary Vibrations of Strings	الاهتزاز العادي للأوتار
P-Branes	P- بران (غشاء)
After The Bang (ATB)	بعد الانفجار الهائل (بعد لحظة بداية الكون)
ATB	بعد لحظة الانفجار الهائل (بعد لحظة بداية الكون)
Extended Dimension	البعد الممتد
Z Boson	بوزون Z
W Boson	بوزون W
Weak Gauge Bosons	البوزونات القياسية الضعيفة
Time, Effect Of Motion On	تأثير الحركة في الزمن
Tachyons	التاكيونات
Taus	تاوات
Double-Slit Experiments	تجارب الشقوق المزدوجة
Curvature of Spacetime	تحدب الزمكان
Mirror Manifolds	تحدب المرايا
Radioactive Decay	التحلل الإشعاعي
Flop Transitions	التحولات الانقلابية (الفجائية)
Topology Changing Transitions	تحولات التغيرات الطوبولوجية
Phase Transitions	التحولات الطورية
Conifold Transitions	التحولات المخروطية
Primordial Nucleosynthesis	التخليق النووي البدائي (الأولي)
Uniform Vibration	التذبذب (الاهتزاز) المنتظم
Frequency Wave	تردد الموجة
Singularity	تفرُّد (غرابة)
Lorentz Contraction	تقلص (انكماش) لورنس
Time Dilation	تمدد الزمن
Spacetime, Tearing of	تمزق الزمكان
Symmetry	التناظر
Rotational Symmetry	التناظر الدوراني
Supersymmetry	التناظر الفائق
Strong Force Symmetry	تناظر القوة القوية
Gauge Symmetry	التناظر القياسي
Mirror Symmetry	تناظر المرآة (صورة المرآة)
Plank Tension	توتر (شد) بلانك
Grand Unification	التوحيد الأعظم

String Coupling Constant	ثابت ازدواج الوتر
Plank's Constant	ثابت بلانك
Cosmological Constant	الثابت الكوني (الكوسمولوجي)
Wormholes	ثقب الدودة
Black Holes	الثقوب السوداء
"Designer"	الثقوب السوداء (ديزاينر)
Extremal Black Holes	الثقوب السوداء القصوى
Three-Branes	ثلاثة بران (غشاء ثلاثي)
Duality	الثنائية
Wave-Particle Duality	ثنائية الموجة–الجسيمة
First Superstring Revolution	ثورة الأوتار الفائقة الأولى
Second Superstring Revolution	الثورة الأوتار الفائقة الثانية
Super Gravity	الجاذبية الفائقة
Higher-Dimensional Supergravity	الجاذبية الفائقة كثيرة الأبعاد
Elementary Particles / Particles, Elementary	الجسيمات الأولية
Force Particles	جسيمات القوة
Messenger Particles	الجسيمات المرسال
Probe Particle	الجسيمات المسبار (جسيمات الاختبار)
Antiparticles	الجسيمات المضادة
Point Particles	الجسيمات النقاط
BPS States	حالات BPS
Coherent State of Strings	الحالة المتماسكة للأوتار
Determinism	الحتمية
Accelerated Motion	حركة تسارعية
Constant-Velocity Motion	حركة ثابتة السرعة الموجهة
Force-Free Motion	الحركة الحرة (من دون تأثير من قوى خارجية)
Non-Constant Velocity Motion	الحركة متغيرة السرعة (غير ثابتة)
Spin	الحركة المغزلية (سبين)
Boson, Spin Of	الحركة المغزلية للبوزونات
Probing Sensitivity	حساسية الاختبار
Loops of Strings	حلقات (أنشوطات) الأوتار
Cosmic Background Radiation	الخلفية الإشعاعية الكونية
Wave Functions	الدالات الموجية
Euler-Beta-Function	دالة يولر بيتا

Temperature of Black Holes	درجة حرارة الثقوب السوداء
Atoms	ذرات
Quantum Foam	الرغوة الكمية
Time	زمان، زمن، وقت
Spacetime	الزمكان
Plank Time	زمن بلانك
Light Clocks	الساعات الضوئية
Speed	السرعة
Sound, Speed of	سرعة الصوت
Light, Speed of	سرعة الضوء
Amplitude of Waves / Wave Amplitude	سعة الموجة
Squarks	سكواركات
Light-Years	السنوات الضوئية
Sneutrinos	سنيوترينوات
Selectrons	سيليكترونات
Force Charges	شحنات القوة
Superpartners	الشركاء (الرفاق) الفائقون
Sun	الشمس
Zero-Branes	صفر بران (غشاء)
Ultraviolet Light	الضوء فوق البنفسجي
Energy	الطاقة
Plank Energy	طاقة بلانك
Winding Energy of Strings	طاقة لف الأوتار (التفاف)
Plank Length	طول بلانك
Wavelength	طول الموجة
Quantum Wavelength	طول الموجة الكمية
Orbifolding	طي المدار
Photoelectric Effect	الظاهرة (التأثير) الكهروضوئية
Universe	العالم (الكون)
Garden-Hose Universe	عالم خرطوم المياه
Multiverse	عالم متعدد
Families of Elementary Particles	عائلات الجسيمات الأولية
Winding Number	عدد الدوران (الالتفاف)
Vibration Number	عدد الذبذبة

Momentum	العزم
Astronomers	علماء الفلك
Human Life Expectancy	العمر المتوقع للإنسان
Gravitons	الغرافيتونات
World Sheet	الغشاء العالمي
Gluinos	غلوينوات
Gluons	غليونات
Calabi-Yau Spaces (Shapes)	فراغات (أشكال) كالابي-ياو
Space	الفضاء (المكان)
Flat Space	الفضاء المستوي
Photons	فوتونات
Photinos	الفوتينوات
Fermions	الفيرميونات
Physics, Classical	الفيزياء الكلاسيكية (التقليدية)
Second Law of Thermodynamics	القانون الثاني للديناميكا الحرارية
Lumps of Energy	قطع (كتل أو قبس) من الطاقة
COBE (Cosmic Background Explorer)	القمر الصناعي لاختبار الخلفية
Satellite	الكونية-الإشعاعية COBE
Newton's Laws of Motion	قوانين الحركة لنيوتن
Physical Laws	القوانين الفيزيائية
Electroweak Force / Weak Force	القوة الضعيفة
Strong Force	القوة القوية
Forces, Fundamental	القوى الأساسية
Gravitational Force	قوى الجاذبية
Nuclear Forces	القوى النووية
Plank Mass	كتلة بلانك
Quantum Chromodynamics	الكروموديناميكا الكمية
Symmetry Breaking	كسر التناظر (إلغاء التناظر)
Solar Eclipses	الكسوفات الشمسية
Quanta	كم (كوانتا)
Quantum Electrodynamics	الكهروديناميكا الكمية
Charm Quark	الكوارك الأنيق
Strange Quark	الكوارك الغريب
Quarks	الكواركات

Up-Quarks	الكواركات الأعلى
Down Quarks	الكواركات السفلى
Bottom Quarks	كواركات قاع
Top Quarks	كواركات القمة
Antiquarks	الكواركات المضادة
Quasars	الكوازارات
String Cosmology	كوسمولوجيا الأوتار
Inflationary Cosmology	الكوسمولوجيا التضخمية
Chirality	الكيرالية (الكَفِّيّة)
Dark Matter	المادة الداكنة
Antimatter	المادة المضادة
Anthropic Principle	المبدأ البشري
Equivalence Principle	مبدأ التكافؤ
Uncertainty principle	مبدأ عدم التيقن
Principle of Relativity	مبدأ النسبية
Holographic Principle	المبدأ الهولوغرافي
Gravitational Field	مجال الجاذبية
Physics, Field of	مجال الفيزياء
Supersymmetric Quantum Field	مجال الكم فائق التناظر
Galaxies	المجرات
Milky Way Galaxy	مجرة درب اللبانة
"Sum Over Paths"	مجموع المسارات
Quantum Tunneling	المرور في نفق الكم
Light Paths	مسارات الضوء
Quantum Smearing	المسح الكمي (اللطخ، البقع)
Superconducting Supercollider	المصادم الفائق ذو التوصيل الفائق
Klein-Gordon Equation	معادلة كلاين-غوردون
Large Hadron Collider	معجل الهادرونات الكبير
Particle Accelerators	معجلات الجسيمات
Horizon Problem	معضلة الأفق
Magnetism	المغناطيسية
Waves	موجات
Electron Waves	موجات الإلكترون
Probability Waves	موجات الاحتمال

Sound Waves	موجات الصوت
Light Waves	موجات الضوء
Electromagnetic Waves	الموجات الكهرومغناطيسية
Water, Waves of	موجات المياه
Microwaves	الموجات الميكروية
Quantum Mechanics	ميكانيكا الكم
Muons	ميونات
Torus	نتوء
Stars	النجوم
Binary Stars	النجوم المزدوجة
Neutron Stars	النجوم النيوترونية
Theories, Scientific	نظريات علمية
M-Theory	نظرية-M
Perturbation Theory	النظرية الاضطرابية
String Theory	نظرية الأوتار
Bosonic, String Theory	نظرية الأوتار البوزونية
Superstring Theory	نظرية الأوتار الفائقة
Supersymmetric String Theory	نظرية الأوتار فائقة التناظر
Type I String Theory	نظرية الأوتار من النوع I
Type IIA String Theory	نظرية الأوتار من النوع IIA
Type IIB String Theory	نظرية الأوتار من النوع IIB
Newton's Universal Theory of Gravity	نظرية الجاذبية العالمية لنيوتن
Chaos Theory	النظرية الشواشية
Quantum Electroweak Theory	نظرية القوى الكهربية-الكمية الضعيفة
Kaluza-Klein Theory	نظرية كالوزا-كلاين
Theory of Everything (T.O.E.)	نظرية كل شيء
Maxwell's Electromagnetic Theory	نظرية ماكسويل الكهرومغناطيسية
Quantum Field Theory	نظرية مجال الكم
Relativistic Quantum Field Theory	نظرية مجال الكم النسبي
Point-Particle Quantum Field Theory	نظرية مجال الكم للجسيمة النقطة
Unified Field Theory	نظرية المجال الموحد
Special Theory of Relativity	نظرية النسبية الخاصة
General Theory of Relativity	نظرية النسبية العامة
Final Theory / Ultimate Theory	النظرية النهائية

Standard Model of Particle Physics	النموذج القياسي لفيزياء الجسيمات
Standard Model of Cosmology	النموذج القياسي للكوسمولوجيا
Neutrinos	نيوترينوات
Tau-Neutrinos	نيوترينوات تاو (تاونيوترينوات)
Euclidean Geometry	الهندسة الإقليدية (المستوية)
Algebraic Geometry	الهندسة الجبرية
Riemannian Geometry	هندسة ريمان
Quantum Geometry	الهندسة الكمية
Noncommutative Geometry	الهندسة اللاتبادلية
One-Branes	واحد-بران (غشاء)

المراجع

Books

Abbot, Edwin A. *Flaltand: A Romance of Many Dimensions*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1991.

Barrow, John D. *Theories of Everything: The Quest for Ultimate Explanation*. New York: Fawcett-Columbine, 1992.

Bronowski, Jacob. *The Ascent of Man*. Boston: Little, Brown, [1974].

Clark, Ronald W. *Einstein: The Life and Times*. New York: Avon Books, 1984.

Crease, Robert P. and Charles C. Mann. *The Second Creation: Makers of the Revolution in Twentieth-Century Physics*. Rev. ed. New Brunswick, NJ: Rutgers University Press, 1996.

Davies Paul, *Superforce: The Search of a Grand Unified Theory of Nature*. New York: Simon & Schuster, 1984.

——. Paul (ed.). *The New Physics*. Cambridge, MA [Cambridgeshire]; NewYork: Cambridge University Press, 1989.

——. Paul and Julian Brown (eds.). *Superstrings: A Theory of Everything?* Cambridge, MA [Cambridgeshire]; NewYork: Cambridge University Press, 1988.

Deutsch, David. *The Fabric of Reality: The Science of Parallel Universes.. and Its Implications*. New York: Allen Lane, 1997.

Einstein, Albert. *The Meaning of Relativity*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1988.

——. *Relativity: The Special and the General Theory: A Popular Exposition = Uber die spezielle und die allgemeine relativitats theorie*. Authorized Translation by Robert W. Lawson. 17th ed. New York: Crown Publishers, [1961].

Ferris, Timothy. *Coming of Age in the Milky Way*. New York: Anchor Books, 1989.

——. *The Whole Shebang: A State-of-the-Universe(s) Report*. New York: Simon & Schuster, 1997.

Feynman, Richard P. *The Character of Physical Law*. Cambridge, MA:

MIT Press, [1965]. (The MIT Press Paperback Series; 66)
——. *QED: The Strang Theory of Light and Matter*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1988. (Alix G Mautner Memorial Lectures)

Folsing, Albrecht. *Albert Einstein: A Biography=Albert Einstein: Eine Biographie*. Translated from The German by Ewald Osers. New York; London: Viking, 1997.

Gamow, George. *Mr. Tompkins in Paperback*. Illustrated by the Author and John Hookham. Canto ed. Cambridge, MA; NewYork: Cambridge University Press, 1993.

Gell-Mann, Murray. *The Quark and the Jaguar: Adventures in the Simple and the Complex*. New York: W.H. Freeman, 1994.

Glashow, Sheldon. *Interactions: A Journey through the Mind of a Particle Physicit and the Matter of this World*. New York: Warner Books, 1988.

Guth, Alan H. *The Inflationary Universe: The Quest for a New Theory of Cosmis Origins*. With a Forward by Alan Lightman. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing, 1997.

Hawking, Stephen. *A Brief History of Time: From the Big Bang to Black Holes*. Introduction by Carl Sagan; Illustration by Ron Miller. Toronto; New York: Bantam Books, 1988.

—— and Roger Penrose. *The Nature of Space and Time*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1996. (The Isaac Newton Institute Series of Lectures)

Held, A. (ed.). *General Relativity and Gravitation: One Hundred Years after the Birth of Albert Einstein*. NewYork: Plenum Press, 1980. 2 vols.

Hey, Tony and Patrick Walters. *Einstein's Mirror*. Cambridge, MA; New York.: Cambridge University Press, 1997.

Hoffman, Banesh and Helen Dukas. *Albert Einstein: Creator and Rebel*. NewYork: Viking Press, [1972].

Howard, Don and John Stachel (eds.). *Einstein and The History of General Relativity: Based on the Proceedings of the 1986 Osgood Hill Conference, North Andover, Massachusetts, 8-11 May 1986*. Boston: Birkhauser, 1989. (Einstein Studies; 1)

Kaku, Michio. *Hyperspace: A Scientific Odyssey through Parallel*

Universes, Time Warps, and the Tenth Dimension. New York: Oxford University Press, 1994.

Kaku, Michio and Jennifer Trainer Thompson. *Beyond Einstein: The Cosmic Quest for The Theory of The Universe*. New York: Anchor Books, Doubleday, 1987.

Kuhn, Thomas S. *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894-1912*. Oxford: Clarendon Press; NewYork: Oxford University Press, 1978.

Laplace, Pierre Simon. *Philosophical Essay on Probabilities=Essai Philosophique sur les probabilités*. Translated from The Fifth French Edition of 1825, with Notes by the Translator, Andrew I. Dale. New York: Springer-Verlag, 1995. (Sources in the History of Mahtematics and Physical Sciences; 13)

Lederman, Leon and Dick Teresi, *The God Particle: If The Universe is the Answer, What is the Question?* Boston: Houghton Mifflin, 1993.

Lindley, David. *The End of Physics: The Myth of a Unified Theory*. New York: Basic Books, 1993.

——. *Where Does the Weirdness Go?: Why Quantum Mechanics is Strange, but Not as Strange as You Think*. New York: Basic Books, 1996.

Newton, Isaac, Sir. *Sir Isaac Newton's Mathematical Principles of Natural Philosophy, and His System of the World*. Translated into English by Andrew Motte in 1729. The Translations Rev., and Supplied with an Historical and Explanatory Appendix by Florian Cajori. Berkeley; CA: University of California Press, 1962. 2 vols.

Overbye, Dennis. *Lonely Hearts of the Cosmos: The Scientific Quest for the Secret of the Universe*. New York: HarperCollins, 1991.

Pais, Abraham. "*Subtle Is the Lord--*": *The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford [Oxfordshire]; New York: Oxford University Press, 1982.

Penrose, Roger. *The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics*. Foreword by Martin Gardner. Oxford, New York: Oxford University Press, 1989.

Rees, Martin J. *Before the Beginning: Our Universe and Others*. Foreword by Stephen Hawking. Reading, MA: Addison-Wesley,

1997. (Helix Books)

Smolin, Lee. *The Life of the Cosmos*. New York: Oxford University Press, 1997.

Stefano, Rosanne di. *Notes on The Conceptual Development of Supersymmetry*. New York: Institute of Theoretical Physics, State University of New York Stony Brook, [n.d.].

Thorne, Kip S. *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*. New York: W.W. Norton, 1994. (Commonwealth Fund Book Program Series)

Weinberg, Steven. *Dreams of a Final Theory*. New York: Pantheon Books, 1992.

——. *The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe*. Updated ed. New York: Basic Books, 1993.

Wheeler, John Archibald. *A Journey into Gravity and Spacetime*. New York: Scientific American Library, 1990. (Scientific American Library Series; 31)

Periodicals

Clark, R. W. "Einstein: The Life and Times." *Science*: no. 174, (Martin J. Klein).

Cole, K. C. "A Theory of Everything." *NewYork Times Magazine*: 18 October 1987.

Freedman, Daniel Z. and Peter Van Nieuwenhuizen. "The Hidden Dimensions of Spacetime." *Scientific American*: vol. 252, March 1985.

Ginsparg, Paul and Sheldon Glashow. "Desperately Seeking Superstrings." *Physics Today*: May 1986.

Witten, Edward. "Reflections on The Fate of Spacetime." *Physics Today*: April 1996.

Conferences and Meetings

Proceedings of the XXIV International Conference on High Energy Physics, Munich, Fed. Rep. of Germany, August 4-10, 1988. Edited by R. Kotthaus and J. H. Kühn. Berlin; NewYork: Springer-Verlag, 1989.

The Superworld I: *Proceedings of the Twenty-Forth Course of the*

International School of Subnuclear Physics on the Superworld, Held August 7-15, 1986, In Erice, Sicily, Italy. Edited by Antonino Zichichi. New York: Plenum Press, 1990. (The Subnuclear Series; 24)

United States. Congress. Senate. Committee on Banking, Housing and Urban Affairs. Subcommittee on Financial Institutions: *Financial Structure and Regulation: Hearings, Ninety-Third Congress, First Session... November 6, 7, and 8, 1973*. Washington, DC: U.S. Government Printing Office, 1973.

الفهرس

- ب -

- ت -

- ث -

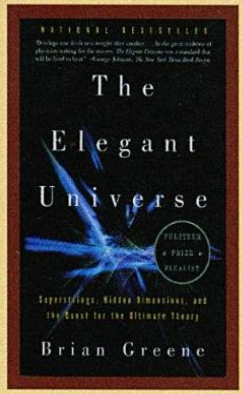
- ج -

- ح -

- ف -

- ن -

الكـــون الأنيـــق



ليس هذا الكتاب كتاباً علمياً عادياً. إنه كتاب يعرض أحدث النظريات في الفيزياء وعلم الكون (الكوسمولوجيا) في لغة تجمع بين الدقة العلمية والأسلوب الأدبي الرفيع. فيه أسلوب سلس، مشوق، مثلما هو الحال في الروايات أو في الأحداث الدرامية. لذلك فهو كتاب يتوجه إلى أوسع الأصناف من القراء: إلى المتخصصين وإلى الطلاب والمثقفين وكذلك إلى من لهم رغبة في المعرفة العلمية من القراء العاديين.

- **براين غرين:** أستاذ فيزياء ورياضيات في جامعة كولومبيا منذ عام ١٩٩٦. ألقى المحاضرات العامة والتقنية في أكثر من عشرين بلداً. وهو معروف بعدد من الاكتشافات التي قام بها في مجال نظرية الأوتار الفائقة.

- **أصول المعرفة العلمية**
- **ثقافة علمية معاصرة**
- **فلسفة**
- **علوم إنسانية واجتماعية**
- **تقنيات وعلوم تطبيقية**
- **آداب وفنون**
- **لسانيات ومعاجم**

المنظمة العربية للترجمة

ISBN9953-0-0431-5
9799953297933

الثمن: ١٥ دولاراً
أو ما يعادلها